



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

DETEKCE ZBYTKOVÉ VLHKOSTI PÓROVITÉHO PROSTŘEDÍ METODOU ELEKTRICKÉ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE

DETECTION OF RESIDUAL MOISTURE OF POROUS MEDIA USING ELECTRICAL IMPEDANCE
SPECTROMETRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

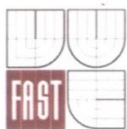
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ZUZANA MÜNSTEROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JANA PAŘÍLKOVÁ, CSc.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. Zuzana Múnsterová

Název Detekce zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí metodou elektrické impedanční spektrometrie

Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2015

Datum odevzdání diplomové práce 15. 1. 2016

V Brně dne 31. 3. 2015

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- ATKINSON, J. H. (2007) The mechanics of soils and foundations. 2nd ed. Taylor & Francis.
- DINGMAN, S. L. (2002). "Chapter 6, Water in soils: infiltration and redistribution". Physical Hydrology (Second ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc. p. 646. ISBN 0-13-099695-5.
- LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V. (1969). "Chapter 3: Description of an Assemblage of Particles". Soil Mechanics (First ed.). John Wiley & Sons, Inc. p. 553. ISBN 0-471-51192-7. Mechanika zemin a zakládání staveb. Vydavatelství ČVUT. 214 s.
- LAWRENCE, J. E., HORNBERGER, G. M. (2007). Soil moisture variability across climate zones. Geophys. Res. Lett. 34 (L20402): L20402. Bibcode:2007GeoRL.3420402L. doi:10.1029/2007GL031382.
- OZCEP, F., ASCI, M., TEZEL, O., YAS, T., ALPASLAN, N., GUNDOGDU, D. (2005). Relationships Between Electrical Properties (in Situ) and Water Content (in the Laboratory) of Some Soils in Turkey. Geophysical Research Abstracts 7.
- van GENUCHTEN, M. T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils". Soil Science Society of America Journal 44 (5): 892–898. doi:10.1029/2007GL031382.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Cílem práce je posouzení vhodnosti metody elektrické impedanční spektrometrie (včetně realizované měřicí aparatury) pro úlohu detekce zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí. Rešerše podkladů k problematice detekce zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí a měřicí metodě elektrické impedanční spektrometrie.

Návrh laboratorního experimentu, měřicího stanoviště včetně techniky, koncepce měření a realizace měření.

Zpracování vybraných měření.

Dokumentace a vyhodnocení měření.

Posouzení vhodnosti zvoleného přístupu vzhledem k cíli práce.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).


doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.
vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá otázkou detekce zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí s využitím měřicí aparatury založené na aplikaci metody elektrické impedanční spektrometrie (EIS). Pro měření jsou použity přístroje Z-metr třetí a čtvrté generace, které byly realizovány řešením projektů mezinárodního programu aplikovaného výzkumu EUREKA. Experiment byl proveden v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrická impedanční spektrometrie, sonda, přístroj Z-metr, zbytková vlhkost, pórovité prostředí.

ABSTRACT

Diploma thesis examines detection of residual moisture of porous media of using the measuring apparatus based on the application of the method of electrical impedance spectrometry (EIS). The devices Z-meter of third and fourth generation, were used for measurement, which were designed in projects international applied research. Experiment was executed in Laboratory of Water Management Research, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology.

KEY WORDS

Electrical impedance spectrometry, probe, Z-meter device, residual moisture, porous media.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Zuzana Münsterová *Detekce zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí metodou elektrické impedanční spektrometrie*. Brno, 2015. 84 s., 11 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s využitím rad své vedoucí doc. Ing. Jany Pařílkové, CSc. a použila jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Brně dne 15.01.2016

.....
podpis autora
Bc. Zuzana Münsterová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji své vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. Janě Pařílkové za pomoc při měření v laboratoři, zpracovávání a vyhodnocování dat, zapůjčení literatury a měřicí techniky, a za připomínky, cenné a odborné rady při vypracovávání diplomové práce a panu Luboši Pařílkovi děkuji za realizaci měřicího válce a navržených sond.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	9
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	10
1 ÚVOD.....	13
1.1 Cíl práce	14
1.2 Postup řešení diplomové práce.....	14
2 VODA V ZEMINÁCH	16
2.1 Obsah vody v zemině.....	16
2.2 Druhy vod v zemině.....	16
2.2.1 Voda gravitační	17
2.2.2 Voda kapilární	17
2.2.3 Voda vázaná	17
2.3 Vliv vody na zeminy	18
2.3.1 Promrzání zeminy	18
2.3.2 Smršťování zeminy	18
2.3.3 Bobtnání zeminy	18
2.4 Proudění vody zeminou.....	18
3 VLASTNOSTI ZEMIN	21
3.1 Základní fyzikální vlastnosti zemin	21
3.1.1 Objemová hmotnost zeminy.....	21
3.1.2 Objemová tíha zeminy	21
3.1.3 Vlhkost	22
3.1.4 Zdánlivá hustota pevných částic.....	22
3.1.5 Charakteristiky vzájemného poměru fází v zemině	23
3.2 Zrnitost.....	24
3.3 Pevnost zemin	25
3.4 Propustnost zemin	25
3.5 Stlačitelnost zemin	25
3.6 Zhutnění zemin	25
3.6.1 Proctorova zkouška zhutnění	26
4 VYBRANÉ METODY DETEKCE VLHKOSTI	27
4.1 Gravimetrická metoda	27
4.2 Elektrické metody	28
4.2.1 Komerčně dostupná zařízení	29

4.3	Elektrická impedanční spektrometrie	30
5	MĚŘICÍ PŘÍSTROJE Z-METR	34
5.1	Měřicí přístroj Z-metr III.....	34
5.2	Měřicí přístroj Z-metr IV v.0	35
5.3	Měřicí přístroj Z-metr IV	36
5.4	Nastavení parametrů přístrojů Z-metr	37
6	ZAŘÍZENÍ POUŽITÁ PŘI MĚŘENÍ	39
6.1	Měřicí sondy.....	39
6.2	Měřicí válec.....	40
6.3	Použitý materiál.....	41
6.3.1	Skleněné kuličky	41
6.3.2	Zrna zemina.....	42
6.4	Ostatní pomůcky	43
7	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	45
7.1	Frekvenční analýza	45
7.2	Korelace měřicí frekvence	50
7.3	Měření metodou EIS	51
7.3.1	Měření parametrů pitné vody	52
7.3.2	Měření vybraného materiálu	57
7.4	Zbytková vlhkost materiálů stanovená gravimetrickou metodou.....	69
7.5	Porovnání metody EIS s metodou gravimetrickou.....	72
8	ZÁVĚR.....	75
9	POUŽITÁ LITERATURA	78
	SEZNAM TABULEK	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ	82
	SEZNAM PŘÍLOH.....	84

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Název
EIS	elektrická impedanční spektrometrie
FAST	Fakulta stavební
FAT.....	File Allocation Table – tabulka informací o obsazení diskuv souborovém systému pro DOS (Disk Operating Systém – diskovýoperační systém)
GPRS	General Packet Radio Service – služba umožňující uživatelůmmobilních telefonů GSM přenos dat a připojení k Internetu (případněk jiným sítím)
GSM	Globální Systém pro Mobilní komunikaci
LAN	Local Area Network – síťová karta
LCD	Liquid Crystal Display – tenké a ploché zobrazovací zařízeníobsahujících omezený počet barevných nebo monochromatickýchpixelů skládajících se z tekutých krystalů
LVV	Laboratoř vodohospodářského výzkumu
pH	záporný didaktický logaritmus číselné hodnoty koncentracevodíkových iontů v roztoku
SD	Secure Digital – paměťová karta
USB	univerzální sériová metoda
ÚVST.....	Ústav vodních staveb
VUT v Brně	Vysoké učení technické v Brně
Wi-Fi.....	Wireless Fidelity – bezdrátová komunikace v počítačových sítích

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Název	Jednotka
Θ	normalizovaná efektivní objemová vlhkost	[-]
γ	objemová tíha zeminy	[N·m ⁻³]
φ	fázový posuv	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
θ	objemová vlhkost	[-]
θ_r	reziduální vlhkost	[-]
θ_s	objemová vlhkost nasycené zeminy	[-]
ρ	objemová hmotnost zeminy	[kg·m ⁻³]
ρ'	měrný specifický odpor (rezistivita)	[Ω ·m ⁻¹]
ρ_s	zdánlivá hustota pevných částic	[kg·m ⁻³]
ρ_w	objemová hmotnost vody	[kg·m ⁻³]
σ	schopnost látky vést elektrický odpor (konduktivita)	[Ω^{-1} ·m ⁻¹]
ω	úhlová rychlost	[Hz]
A	průřezová plocha elektrického vodiče	[m ²]
B	zdánlivá elektrická vodivost (susceptance)	[S]
C_c	číslo křivosti	[-]
C_u	číslo nestejnozrnatosti	[-]
d_{10}	průměry zrn příslušejících 10 % propadu	[m]
d_{30}	průměry zrn příslušejících 30 % propadu	[m]
d_{60}	průměry zrn příslušejících 60 % propadu	[m]
d_{ef}	efektivní zrno	[m]
e	číslo pórovitosti	[-]
f	frekvence	[Hz]
g	gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
G	elektrická vodivost	[S]
h	hloubka	[m]
h_1, h_2	piezometrické výšky	[m]

h_k	kapilární výška	[m]
I	hydraulický gradient	[-]
\mathbf{I}	fázor elektrického proudu	[A]
j	imaginární číslo	[-]
l	vzdálenost elektrod	[m]
L	délka vzorku	[m]
m	hmotnost zeminy	[kg]
m_a	hmotnost plynné složky	[kg]
m_n	hmotnost nádoby	[kg]
m_{n+s}	hmotnost nádoby se suchým materiálem	[kg]
m_{n+s+w}	hmotnost nádoby s materiálem a vodou	[kg]
m_{n+s+w0}	hmotnost nádoby s materiálem a vodou při volném odvodnění	[kg]
m_s	hmotnost suchého materiálu (pevné složky)	[kg]
m_{s+w}	hmotnost materiálu a vody	[kg]
m_w	hmotnost vody (kapalné složky)	[kg]
n	pórovitost	[-]
n_a	aktivní pórovitost	[-]
Q	celkový průtok vody vzorkem	[m ³ ·s ⁻¹]
R, R_x	reálná složka elektrické impedance (rezistance)	[Ω]
S_a	stupeň nasycení vzduchem	[-]
S_w	stupeň nasycení vodou	[-]
t	čas	[s]
t_v	teplota vody	[°C]
t_{vz}	teplota vzduchu	[°C]
T	perioda	[-]
\mathbf{U}	fázor elektrického napětí	[V]
V	objem zeminy	[m ³]
V_a	objem plynné složky	[m ³]
V_n	objem nádoby	[m ³]
V_p	objem pórů při plném nasycení objemu vodou	[m ³]

V_{pa}	objem pórů, který se rovná objemu kapaliny V_{wa}	[m ³]
V_s	objem pevné složky	[m ³]
V_w	objem vody (kapalné složky)	[m ³]
$V_{w'}$	objem kapaliny zaplňující zcela póry	[m ³]
V_{wa}	objem kapaliny, který vyteče působením tíhového zrychlení	[m ³]
V_{wo}	objem odteklé vody	[m ³]
w	hmotnostní vlhkost	[-]
w_{vz}	vlhkost vzduchu	[%]
X, X_x	imaginární složka elektrické impedance (reaktance)	[Ω]
Y	zdánlivá vodivost materiálu (fázor admitance)	[S]
Z	fázor elektrické impedance	[Ω]

1 ÚVOD

Voda je součástí veškeré živé a neživé přírody, stavební složkou tkání, složkou výživy, podmínkou zdraví, předpokladem úspěšné zemědělské výroby, lesního a vodního hospodářství, důležitou surovinou v průmyslové výrobě, prostředkem energetickým, dopravním a rekreačním. Proto je voda základní podmínkou dalšího civilizačního a kulturního rozvoje lidské společnosti [12].

Přítomnost vody v různé formě v pórovitém prostředí resp. materiálech organického a anorganického původu má v mnohých případech zásadní význam pro kvalitu tohoto prostředí z hlediska jeho užitkových, technologických či skladovacích vlastností. Voda jako složka pórovitého prostředí přímo ovlivňuje například jeho hmotnost a hustotu; nepřímo ovlivňuje i další fyzikální, fyzikálně-chemické a chemické vlastnosti, což se projevuje na hodnotách těchto veličin při jejich měření. Voda má dále vliv na bilanční hodnocení materiálu (např. obilniny, uhlí apod.) při výměně zboží, při parametrizaci jeho vlastností v technologickém procesu nebo využívání (dřevo, stavební materiály, půda atd.).

Význam měření vlhkosti dokladuje množství metod, které byly vyvinuté a které poskytují více nebo méně přesné a spolehlivé výsledky. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o měřicí metody, kde příspěvky chyb pocházejí z různých zdrojů (z měřeného pórovitého prostředí, okolního prostředí, vlhkoměru, koncepce měření či měřiče) je metrologická kontrola potřebná v celém řetězci měřicího postupu, tedy od odebrání měřeného vzorku až po záznam výsledků měření do protokolu. Metrologické zabezpečení je tedy třeba chápat jako průnik dvou oblastí – technického postupu měření vlhkosti, v našem případě pórovitého prostředí, a metrologické návaznosti měřených veličin na příslušné etalony. Zajištění kalibrace vlhkoměrů a jejich metrologické návaznosti není jednoduchá úloha. Pro metodu elektrické impedanční spektrometrie (EIS) a použité měřicí přístroje Z-metry byla kalibrace a metrologická návaznost zajištěna [30], [31]. Jako etalon pro měření elektrické impedance měřicí metodou EIS byl použit RLC můstek HAMEG HM 8118. Problematickou však zůstala volba korelační metody. Vzhledem k metodě EIS by vhodnou volbou byla některá z elektrických metod měření vlhkosti a odpovídající zařízení. Avšak dostupné měřicí aparatury nebylo možno považovat za etalony. Proto jsem jako referenční metodu zvolila metodu gravimetrickou.

Z uvedeného je zřejmé, že komplexní zpracování metrologie vlhkosti pórovitých prostředí představuje poměrně širokou a náročnou mezioborovou problematiku, jejíž úplné zpracování není předmětem mé diplomové práce. Ve své diplomové práci s názvem „Detekce zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí metodou EIS“ jsem se zaměřila na specifickou oblast měření vlhkosti sypkých materiálů reprezentovaných vzorky písků jednotné velikosti zrna a vzorky skleněných kuliček odpovídajících průměrů.

Diplomovou práci jsem rozdělila na tři části, kdy v první části jsem vymezila základní pojmy ve vazbě na experiment, měřené pórovité prostředí a místo realizace experimentu, kterým byla Laboratoř vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého

učení technického v Brně (dále LVV ÚVST FAST VUT v Brně). Při provádění rešerše dostupných literárních zdrojů jsem si všimla nejednotnosti v oblasti definice vlhkosti, proto jsem uvedené části věnovala zvýšenou pozornost. Ve druhé části práce jsou stručně uvedeny elektrické metody měření vlhkosti včetně ověřované měřicí metody elektrické impedanční spektrometrie (EIS) a popsány použité přístroje a zařízení. Ve třetí části jsou prezentovány vybrané výsledky realizovaných měření, postup při jejich dosažení, zhodnocení a v závěrečné části jsou vyvozeny závěry a doporučení.

1.1 CÍL PRÁCE

Cílem mé diplomové práce bylo posoudit vhodnost použití měřicí aparatury s přístroji Z-metr typové řady tři a čtyři, která využívá metodu elektrické impedanční spektrometrie pro detekci zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí.

Přístroje Z-metr jsou vyvíjeny a ověřovány v LVV ÚVST na FAST VUT v Brně řešením mezinárodních projektů aplikovaného výzkumu programu EUREKA. Z-metry se využívají jak při práci v terénu, tak v laboratořích.

Pro experiment jsem použila invazivní tyčovou sondu a soubor neinvazivních bodových sond, který obsahoval 16 měřicích kanálů umístěných ve stěně měřicího válce.

Můj experiment se skládal ze čtyř částí. V první části jsem provedla frekvenční analýzu pórovitého prostředí, kdy jsem stanovila měřicí frekvenci vhodnou pro jednotlivá testovaná pórovitá prostředí. Na základě provedené frekvenční analýzy jsem stanovila závislost frekvence na velikosti efektivního zrna, ze které jsem v druhé části provedla korelaci měřicí frekvence vzhledem k měřenému pórovitému prostředí. Korelaci jsem získala výslednou měřicí frekvenci měření, kterou jsem použila pro celý experiment. V třetí části jsem v měřicím válci tyčovou sondou a bodovými sondami měřila zbytkovou vlhkost pórovitého prostředí. Paralelně s třetí částí jsem realizovala čtvrtou část experimentu, kdy při měření zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí metodou EIS jsem na stejném vzorku provedla stanovení zbytkové vlhkosti metodou gravimetrickou. Výsledkem měření a současně výsledkem diplomové práce, je porovnání obou přístupů ke stanovení zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí.

1.2 POSTUP ŘEŠENÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pro splnění vytýčeného cíle jsem si stanovila následující postup:

- v rámci rešeršní činnosti prostudovat problematiku pórovitého prostředí, druhy vod nacházejících se v tomto prostředí a posoudit přístroje používané pro detekci vlhkosti v pórovitém prostředí,
- seznámit se s principem měření nepřímou kontaktní měřicí metodou EIS s ohledem na určení elektrické impedance,
- seznámit se s dosavadními poznatky a znalostmi v oborech, kde se s uvedenou nepřímou měřicí metodou pracuje vzhledem k aplikaci ve vodním hospodářství,

- na základě provedené rešerše se při řešení diplomové práce zabývat problematikou detekce vlhkosti pórovitého prostředí v laboratorních podmínkách,
- realizovat měření měřicí aparaturou s přístroji Z-metr a vyhodnotit výsledky měření prostřednictvím měřených elektrických veličin,
- realizovat měření gravimetrickou metodou a vyhodnotit jeho výsledky,
- porovnat výsledky měření metodou EIS a metodou gravimetrickou,
- posoudit vhodnost použití speciální měřicí aparatury s přístroji Z-metr, které byly realizovány řešením projektů v mezinárodním programu aplikovaného výzkumu EUREKA.

2 VODA V ZEMINÁCH

Voda, vyskytující se v zeminách je součástí hydrosféry. Zeminy jsou propustné materiály, kterými voda volně protéká přes propojené póry mezi pevnými částicemi. Obsah vody ovlivňuje vlastnosti a chování zemin. S rostoucí vlhkostí nebo stupněm nasycení dochází ke změnám jejich vlastností [03]. Roste-li stupeň nasycení zemin, vzrůstá plasticita a klesá smyková pevnost. Přítomnost vody ovlivňuje i některé technologické vlastnosti zemin důležité pro jejich zpracování. Nadbytek vody může způsobit rozbrždání zeminy a horší zpracovatelnost.

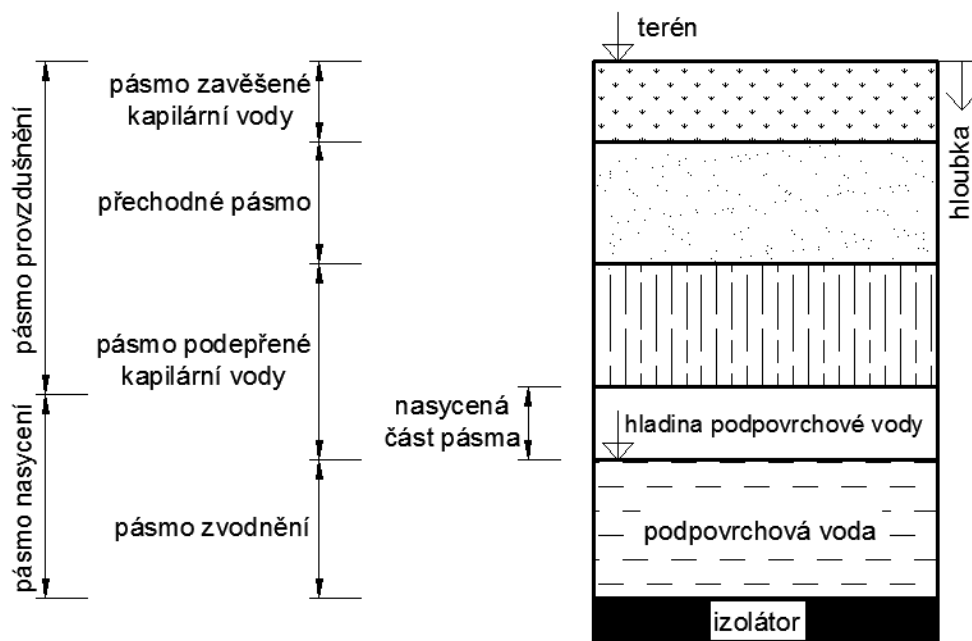
Voda pod povrchem terénu se označuje jako voda podpovrchová. Zdrojem této vody je voda srážková nebo vodní toky a nádrže, odkud voda vsakuje do podloží (voda vadosní) nebo v ojedinělých případech vzniká kondenzací vodních par unikajících z magmatu do povrchových částí zemské kůry (voda juvenilní) [16].

2.1 OBSAH VODY V ZEMINĚ

Za obsah vody v zemině se považuje takové množství vody, které se může odstranit vysušováním zeminy při teplotě $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do stálé hmotnosti. Kvantitativně se obsah vody v zeminách odvozuje pomocí vlhkosti w a stupně nasycení S_w [32].

2.2 DRUHY VOD V ZEMINĚ

Voda v zeminách se vyskytuje převážně ve formě vody gravitační a vody vázané [32]. Dalšími formami jsou voda strukturální, která je součástí krystalické mřížky pevných částic a vodní pára, která se vyskytuje v pórech nenasyčené zeminy. Vodní pára se může kondenzací proměnit na jiné formy, např. ve vodu pevně vázanou. Pohyb vodní páry v zemině závisí na rozdílech tenzí a teplot. Rozdělení vody v půdním a horninovém profilu je patrné z Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Rozdělení vody v půdním a horninovém profilu
Zdroj: Hydraulické aspekty vsakování dešťových vod [08]

2.2.1 Voda gravitační

Voda gravitační (voda volná) je voda v zeminách schopná pohybu převážně působením gravitačních sil [27].

2.2.2 Voda kapilární

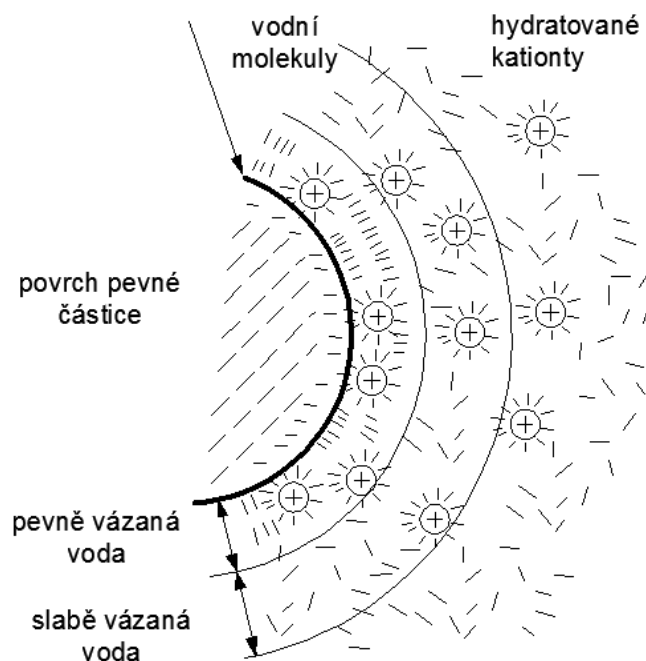
Voda kapilární sytí zeminu nad hladinu podpovrchové vody do tzv. kapilární výšky h_k . V kapilární vodě je relativní podtlak. Výška, do které vystoupí kapilární voda, je nepřímo úměrná velikosti pórů. Kapilární voda nepříznivě ovlivňuje únosnost pláň vozovky a namrzavost zemin [32].

Proudění kapilární vody závisí na kapilární výšce a na průtokovém profilu. V podmínkách České republiky je např. u písků průměr pórů veliký, ale kapilární síla poměrně malá, u jílu je tomu naopak, takže pohyb kapilární vody v těchto zeminách je omezen [16]. U jílu se bere v úvahu, že absorpční blány vázané vody, zaplní prakticky celý průřez kapilár a omezí kapilární pohyb.

2.2.3 Voda vázaná

Vázaná voda je složená z vodních molekul poutaných k povrchům pevných částic zeminy elektrochemickými a elektromolekulárními silami a tvoří okolo nich difúzní obal (Obr. 2.2), tzv. lyosféru z orientovaných molekul vody. Vázaná voda ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti zemin (zejména u jílu a hlín), zapříčiňuje jejich soudržnost a propůjčuje soudržným zeminám v určitém rozsahu vlhkosti plastické vlastnosti [32].

Podle intenzity vazby mezi orientovanými molekulami vody difúzního obalu a povrchem pevných částic se dělí vázaná voda na vodu pevně a slabě vázanou.



Obr. 2.2 Difúzní obal (lyosféra)
Zdroj: Mechanika zemin [32]

Voda pevně vázaná neboli adsorbovaná voda, která se chová jako pevná součást pevných částic, se nazývá vnitřní vrstva difuzního obalu [32]. Voda pevně vázaná tvoří jen velmi tenkou vrstvu na povrchu částice. K jejímu odstranění jsou potřebné vysoké teploty 150 °C – 300 °C.

Slabě vázaná voda neboli voda obalová či osmotická tvoří vnější, méně pevně připoutané vrstvy kolem pevných částic. Ze zeminy je ji možné odstranit i mechanicky (stlačením) [32].

Vlastnosti vody slabě vázané se blíží charakteristice vody gravitační [16]. Tloušťka vrstvy slabě vázané vody závisí mimo jiné na koncentraci iontů a na valenci kationtů v kapalném prostředí.

2.3 VLIV VODY NA ZEMINY

Voda v zemině má za následek např. promrzání, smršťování a bobtnání zeminy.

2.3.1 Promrzání zeminy

Při záporných teplotách se voda v zemině mění na led. Nejdříve zamrzá volná voda, potom voda kapilární a případně i voda slabě vázaná. Vytvořené krystalky ledu v zemině mají o 9 % větší objem než původní voda, proto dochází k nadzvednutí zeminy a v pórech se vytváří podtlak [32].

Při oteplování led od povrchu postupně taje, ale voda se přes zmrzlé hlubší vrstvy nemůže vsakovat, zemina zvlhne, ztrácí pevnost a tím únosnost. Proto se stavby musí zakládat v tzv. nezámrné hloubce [32].

2.3.2 Smršťování zeminy

Proces smršťování soudržných zemin probíhá při odpařování vody ze zeminy. Zpočátku jsou póry v zemině zaplněny vodou, meniskus hladiny vody v kapiláře není prohnut, takže složka povrchového napětí do stěny kapiláry je nulová [16]. Při odpařování vody, tedy při snižování vlhkosti zeminy, se meniskus prohýbá, složka povrchového napětí roste a způsobuje stlačování zeminy, a tím dochází ke smrštění, tj. ke zmenšení objemu zeminy a tím ke snížení pórovitosti.

2.3.3 Bobtnání zeminy

Bobtnání je proces zvětšování objemu zeminy při jejím namočení do vody. Dochází k němu na základě osmózy, kdy voda proniká do pórů zeminy a na její pevné částice tak působí prostřednictvím bobtnací síly bobtnací tlak. Tento tlak může dosahovat značné velikosti, při prudkých koncentračních šocích může dokonce mechanicky zeminu poškodit. Bobtnací tlak působí proti osmotickému tlaku [02].

2.4 PROUDĚNÍ VODY ZEMINOU

Zeminy jsou tvořeny pevnými částicemi, mezi nimiž jsou póry, které jsou vyplněné tekutinou. Nejčastěji se jedná o vodu a vzduch. Podpovrchová voda proudí navzájem

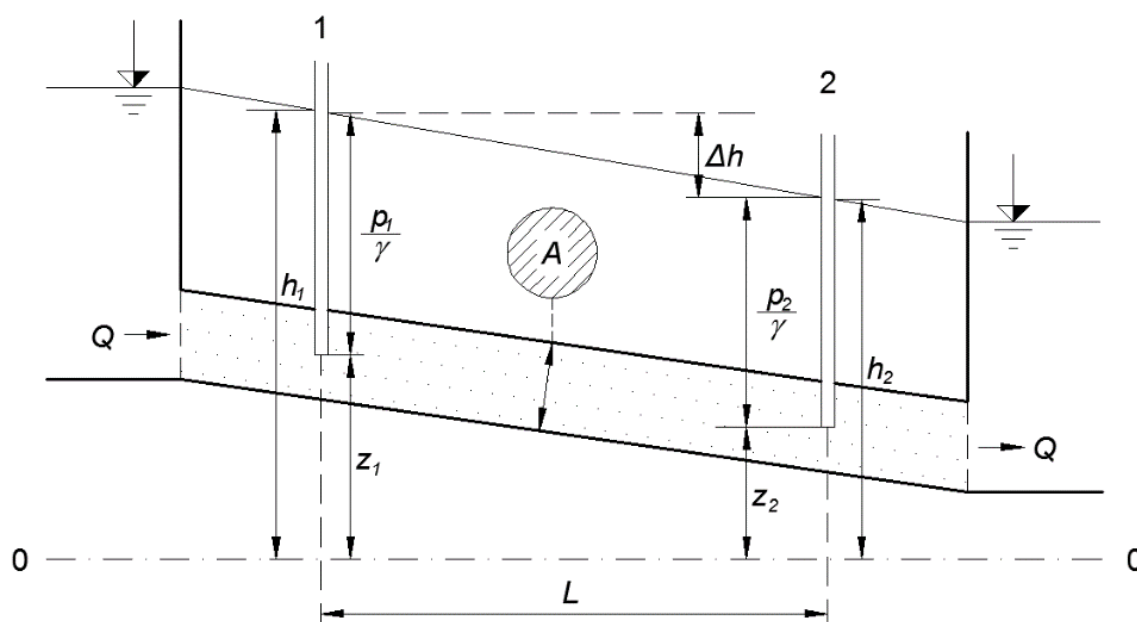
propojenými dutinami (průlinami) – póry zeminy, trhliny a pukliny hornin, pod vlivem hydraulického gradientu. Proudění vody v porézním prostředí je velmi složité proudění, které je závislé na struktuře (geometrii) porézního prostředí a na fyzikálních vlastnostech proudící tekutiny [16].

V letech 1852 – 1855 na základě výsledků experimentálního výzkumu zformuloval Darcy (1856) lineární zákon filtračního proudění podpovrchových vod v pórovitém prostředí [19].

Darcyho vztah (2.1) platí pro ustálené proudění podpovrchových vody.

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{h_1 - h_2}{L} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.1)$$

Předpokládá se, že ve válcovém potrubí s plochou průřezu A [m^2] zaplněném vzorkem zeminy proudí voda (Obr. 2.3), na kterou působí zemská tíže a ve dvou průřezech působí piezometrické výšky h_1 a h_2 [m]. Osa potrubí leží v průřezích 1 a 2 v polohové výšce nad porovnávací geodetickou rovinou z_1 a z_2 [m].



Obr. 2.3 Schéma proudění vody podle Darcyho vztahu

Zdroj: Hydraulika podzemních vod [20]

Darcy na základě experimentů zjistil, že celkový průtok vody Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] trubicí závisí lineárně na hydraulickém gradientu I vyjádřeném vztahem

$$I = \frac{h_1 - h_2}{L} [-] \quad (2.2)$$

Vztah (2.1) pro celkový průtok vody zeminou lze proto zapsat

$$Q = k \cdot A \cdot I [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.3)$$

Konstantou úměrnosti je hydraulická vodivost k [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], která charakterizuje schopnost porézního prostředí převádět vodu, dále charakterizuje tvar a rozložení pevných částic (zrn zeminy) a pórů a zohledňuje fyzikální vlastnosti protékající vody [14], [28].

Ke stanovení hydraulické vodivosti k jsou užívány různé postupy, které se dělí na metody přímé a nepřímé. Mezi přímé metody určení patří zkoušky polní realizované na studované lokalitě většinou různými typy čerpacích (příp. vsakovacích) postupů a metody laboratorní prováděné na odebraných vzorcích zeminy (Obr. 2.4).



Obr. 2.4 Experimentální stanoviště hydraulické vodivosti – LVV ÚVST, blok „F“

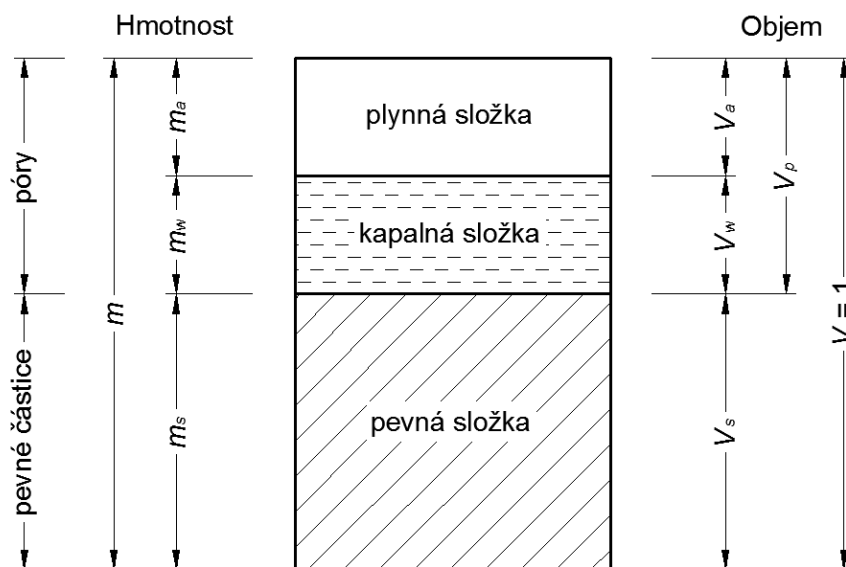
Mezi nepřímé metody určení patří postupy využívající empirických vztahů založených na vyhodnocení granulometrického složení daného materiálu a jeho ulehlosti s přihlédnutím k vlivu teploty proudící kapaliny a způsoby vedoucí k získání globální hodnoty koeficientu hydraulické vodivosti zemin pomocí analogie nebo matematických modelů (inverzní modelování) [27].

3 VLASTNOSTI ZEMIN

Zemina je složité tří složkové prostředí, které obsahuje složku pevnou, plynnou a kapalnou. Poměr a vzájemný vztah těchto tří složek je faktorem, který ovlivňuje chování zemin jako celku. Vlastnosti zemin se určují nejčastěji pomocí laboratorních zkoušek, příp. pomocí zkoušek v terénu [32].

3.1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ZEMIN

Zemina je složena z pevných částic a z pórů [32], které jsou z části (obsahují i vzduch) nebo úplně vyplněny vodou. Na Obr. 3.1 je schematicky vyznačeno zastoupení jednotlivých složek v jednotkovém objemu V zeminy o celkové hmotnosti m . Indexy u těchto veličin vycházejí z anglických názvů a značí: a – vzduch (air), p – póry (pores), s – pevné částice (solid particles) a w – vodu (water).



Obr. 3.1 Tří složkové složení zeminy o objemu V zeminy a hmotnosti m
Zdroj: Hydraulické aspekty vsakování dešťových vod [08]

3.1.1 Objemová hmotnost zeminy

Objemová hmotnost zeminy je hmotnost jednotkového objemu zeminy a pórů, které mohou být vyplněny částečně nebo úplně vodou, případně vzduchem [32]. Objemová hmotnost zeminy ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] se zjišťuje jako podíl hmotnosti zeminy m [kg] a objemu zeminy V [m^3], jaký zaujímá zemina v daném uložení

$$\rho = \frac{m}{V} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}], \quad (3.1)$$

3.1.2 Objemová tíha zeminy

V půdně-mechanických výpočtech se často využívá objemová tíha zeminy γ [$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$] vázaná s objemovou hmotností ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

$$\gamma = g \cdot \rho \text{ [N}\cdot\text{m}^{-3}\text{]}, \quad (3.2)$$

kde g je gravitační zrychlení a jeho hodnota je $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

3.1.3 Vlhkost

Vlhkostí zeminy se rozumí množství vody obsažené v zemině, která se dá ze zeminy odstranit vysušením při teplotě $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do stálé hmotnosti, přičemž v některých odvětvích se zavádí veličina hmotnostní vlhkost w a v některých odvětvích se využívá vlhkost objemová θ .

3.1.3.1 Hmotnostní vlhkost

Hmotnostní vlhkost je definována jako poměr hmotnosti vody v pórech m_w [kg] k hmotnosti pevné složky m_s [kg]

$$w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} [-], \quad (3.3)$$

Pro stanovení hmotnostní vlhkosti se používá tzv. přímé vážení pevné složky m_s (vysušená zemina) a zeminy m [08].

3.1.3.2 Objemová vlhkost

Objemová vlhkost θ je definována jako poměr objemu vody v zemině V_w [m^3] k objemu zeminy V [m^3]

$$\theta = \frac{V_w}{V} = \frac{m - m_s}{V \cdot \rho_w} [-], \quad (3.4)$$

Pro stanovení objemové vlhkosti se používá např. vážení při známých hustotách zeminy a vody [08].

Objemová vlhkost materiálu θ se vyjadřuje i v podobě normalizované efektivní objemové vlhkosti Θ s pomocí objemové vlhkosti nasycené zeminy θ_s a reziduální vlhkosti θ_r

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} [-], \quad (3.5)$$

Hodnota normalizované efektivní objemové vlhkosti se pohybuje v rozmezí $0 - 1$ [08].

3.1.4 Zdánlivá hustota pevných částic

Zdánlivá hustota pevných částic se určuje jako poměr hmotnosti pevných částic zeminy k jejich objemu. Voda pevně vázaná, která zůstane v zemině (po vysušení při teplotě $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$) se počítá za součást zeminy

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{]}, \quad (3.6)$$

kde m_s [kg] je hmotnost vzorku zeminy po vysušení a V_s [m³] je objem malých částic zeminy, které ale samy mohou ještě obsahovat póry. Zdánlivá hustota pevných částic se určuje laboratorně pomocí pyknometru [16].

3.1.5 Charakteristiky vzájemného poměru fází v zemině

3.1.5.1 Pórovitost

Pórovitost (objemová) n je definována jako poměr objemu pórů V_p [m³] (při plném nasycení objemu vodou) k celkovému objemu zeminy V [m³]

$$n = \frac{V_p}{V} = \frac{V_w}{V} = \frac{1-V_s}{V} [-]. \quad (3.7)$$

Pórovitost se určuje např. na základě měření objemu kapaliny V_w zaplňující zcela póry zeminy (kde platí, že objem pórů V_p při plném nasycení vodou se rovná objemu kapaliny zaplňujícího zcela póry V_w) a objemu zeminy V [m³].

Pórovitost je číselným podkladem pro stanovení ulehlosti zeminy, pomocí níž se vyjadřuje pevnost a stlačitelnost zeminy. Zeminy s malou pórovitostí jsou dobré základové zeminy, při zatížení vykazují malou deformaci a velkou pevnost ve smyku. Přímé měření pórovitosti je obtížné, nejčastěji se zjišťuje ze známé hustoty pevných částic a objemové hmotnosti suché zeminy [32].

V případech, kde působí pouze tíhové zrychlení g , se do pohybu nedostává všechna voda, která by mohla zeminou proudit, ale pouze její část, proto je zavedena aktivní pórovitost n_a . Aktivní pórovitost n_a je určena jako poměr objemu pórů V_{pa} [m³], který se rovná objemu kapaliny V_{wa} [m³], která vyteče ze zeminy působením tíhového zrychlení g [m·s⁻²]

$$n_a = \frac{V_{pa}}{V} = \frac{V_{wa}}{V} [-]. \quad (3.8)$$

Aktivní pórovitost se stanovuje např. ve válci se zeminou, ze které se nechá vytéct voda pouze působením tíhového zrychlení [08].

3.1.5.2 Číslo pórovitosti

Je-li pórovitost vyjádřena pomocí vztahu 3.6, jedná se o veličinu, která není konstantní při deformaci zeminy, kdy se mění objem zeminy, a proto se zavádí vyjádření pórovitosti pomocí čísla pórovitosti [32]. Číslo pórovitosti e se udává poměrem objemu pórů V_p [m³] k objemu pevné části zeminy V_s [m³] (suché zeminy)

$$e = \frac{V_p}{V_s} = \frac{V_p}{V-V_p} = \frac{n}{1-n} [-]. \quad (3.9)$$

3.1.5.3 Stupeň nasycení

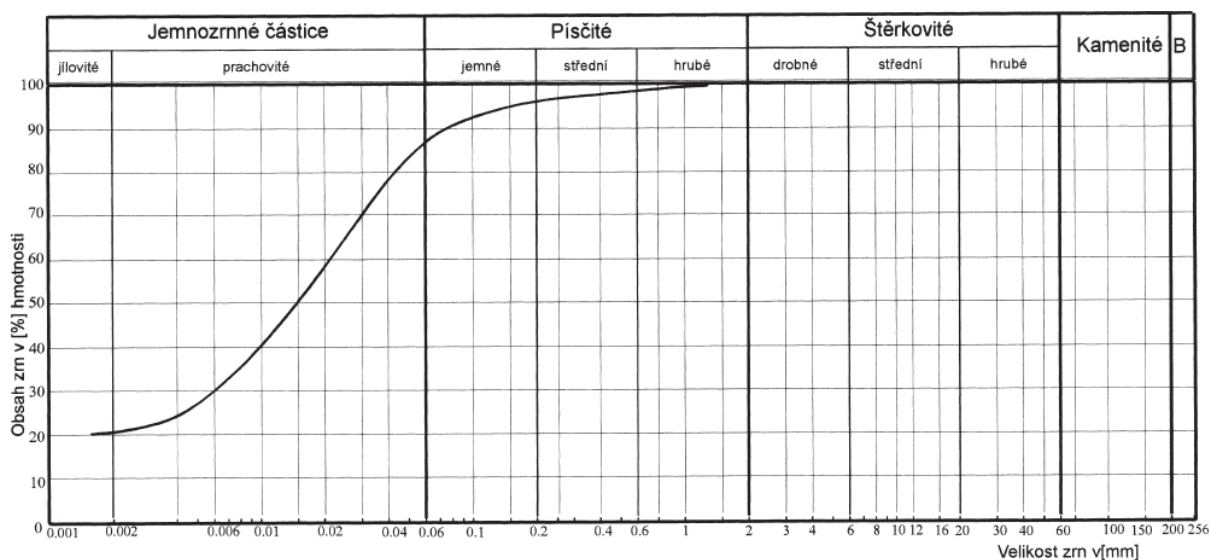
Stupeň nasycení S_w je mírou vyplnění pórů zeminy vodou. Stupeň nasycení pórů zeminy vodou je dán jako poměr objemu vody V_w [m³] k objemu pórů V_p [m³]

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} = \frac{\theta}{n} [-]. \quad (3.10)$$

Hodnota stupně nasycení pórů vodou S_w se teoreticky pohybuje v rozmezí 0 – 1 a určuje se např. z pórovitosti n a objemové vlhkosti θ .

3.2 ZRNITOST

Pro pojmenování a zařazení zeminy i pro odhad dalších jejích vlastností je třeba znát její zrnitostní složení. Množství zrn hrubších než 0,1 mm (resp. 0,125 mm) se stanoví proséváním na sadě sít, procentuální obsah jemnějších zrn se určí hustoměrnou metodou. Z výsledků získaných prosévací i hustoměrnou zkouškou se vynesne křivka zrnitosti (Obr. 3.2) [32].



Obr. 3.2 Křivka zrnitosti
Zdroj: Mechanika zemin [32]

Podle velikosti zrn se zemina dělí na složky – frakce (c – jíl, m – prach, s – písek, g – štěrk, cb – kámen, b – balvan). Rozdělení na složky je podkladem pro klasifikaci zemin, přičemž prachová a jílová složka tvoří skupinu jemných částí označenou písmenem f. Pro klasifikaci písčitých a štěrkových zemin je rozhodujícím kvalitativním znakem číslo nestejnozrnitosti a číslo křivosti.

Číslo nestejnozrnitosti C_u charakterizuje sklon střední části křivky zrnitosti a je dáno vztahem

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} [-], \quad (3.11)$$

kde d_{10} a d_{60} jsou průměry zrn příslušejících 10 % a 60 % propadu.

Číslo křivosti C_c charakterizuje přibližně tvar křivky zrnitosti a je dáno vztahem

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} [-], \quad (3.12)$$

kde d_{10} , d_{30} a d_{60} jsou průměry zrn příslušejících 10 %, 30 % a 60 % propadu [16].

3.3 PEVNOST ZEMIN

Pod pojmem pevnost zeminy se rozumí její smyková pevnost. Zemina se poruší smykem v rovině, ve které je smykové napětí větší než mobilizovaný odpor ve smyku [32].

Znalost parametrů smykové pevnosti umožňuje řešit únosnost zemin, stabilitu svahů, zemní tlaky apod. Při namáhání zeminy nejčastěji dochází k porušení smykem a odpor ve smyku představuje hlavní zdroj pevností zemin.

Pro znázornění napjatostních stavů se používá Mohr-Columbovo zobrazení. Mohrova teorie porušení předpokládá, že k porušení (překročení smykové pevnosti) dojde usmyknutím podél smykové plochy [32]. Z Columbovy teorie porušení vyplývá, že pevnost zeminy ve smyku závisí na vlastnostech zeminy, které jsou charakterizované parametry smykové pevnosti zemin a na velikosti normálového napětí působícího kolmo na smykovou plochu.

3.4 PROPUSTNOST ZEMIN

Proudění vody zeminami je složitý proces, protože voda proudí póry, které mají různý tvar a velikost. Rychlost je v každém místě jiná a pro výpočet se používá určitá míra zjednodušení. Zjišťuje se množství vody proteklé za jednotku času plochou A . Uvažuje se, že voda vyplňuje celou průřezovou plochu spojitě [32].

Způsoby měření propustnosti jsou popsány v ČSN 72 1020 – Laboratorní stanovení propustnosti zemin. Zkouška se provádí v propustoměru s konstantním nebo proměnným hydraulickým sklonem [16].

3.5 STLAČITELNOST ZEMIN

Při zatížení základové zeminy se mění stav napjatosti, vznikají deformace, které vyvolávají sedání základů. Pro výpočet deformace se používá přímé měření stlačitelnosti zemin přístrojem zvaným edometr [16].

Vzorek zeminy je přetlačen z odběrného válce do kovového prstence, který zabraňuje vodorovné deformaci zeminy. Zemina je uložena mezi porézními destičkami, které umožňují odtok vody vytlačené z pórů zeminy během zkoušky. Pákovým systémem se na vzorek zeminy nanáší svislé konsolidační napětí, které vyvolává deformaci zeminy.

3.6 ZHUTNĚNÍ ZEMIN

Zhutnitelnost zeminy závisí na granulometrickém složení, na tvaru zrn, na podílu a vlastnostech výplně z jemných částic a zejména na její vlhkosti.

3.6.1 Proctorova zkouška zhutnění

Proctorova zkouška zhutnění slouží ke stanovení tzv. optimální vlhkosti, při které lze dosáhnout při zvolené hutnící energii největšího zhutnění tzn. maximální objemovou hmotnost suché zeminy [32]. Pro danou metodu zhutňování a hutnící energii je zemina zhutněna na určitou objemovou hmotnost v závislosti na vlhkosti. Objemová hmotnost vysušené zeminy vzrůstá s rostoucí vlhkostí, pokud není dosaženo maximální objemové hmotnosti (maximální zhutnění) při tzv. optimální vlhkosti.

Provedením zkoušky při různých vlhkostech se dostane křivka, jejíž vrchol udává maximální hmotnost vysušené zeminy, která se dosáhne při optimální vlhkosti, která představuje 100 % zhutnění pro danou zeminu [32].

4 VYBRANÉ METODY DETEKCE VLHKOSTI

Měření vlhkosti materiálů je možné dle principu měření rozdělit na metody, u nichž dochází k přenosu vody z materiálu, jehož vlhkost se určuje, do pomocného prostředí (gravimetrické, chemické, extrakční a rovnovážné metody) a na metody, u nichž se vlhkost určuje z měření jiné veličiny funkčně spojené s vlhkostí (tepelně-fyzikální, tenzometrické, optické, akustické, jaderně-fyzikální a elektrické metody).

V případě měření vlhkosti není vhodné dělit měřicí metody na přímé a nepřímé [01], neboť podle [15], či již neplatné normy ČSN 01 0115 Názvosloví v metrologii jsou všechny metody měření vlhkosti nepřímé, protože se hodnota měřené veličiny – vlhkosti při žádném principu měření nezíská přímo, bez měření veličin, které jsou s ní funkčně vázané.

Vzhledem k povaze experimentu a vybavení laboratoře Ústavu vodních staveb jsem pro měření využila metodu gravimetrickou [17], kterou jsem ověřovala možnosti elektrické metody EIS. Uvedená volba není zcela v souladu se zásadami metrologie, neboť měření elektrickou metodou by mělo být ověřováno jinou elektrickou metodou. Gravimetrická metoda je však považována za nejpřesnější a v laboratorních podmínkách nejčastěji užívanou měřicí metodu.

4.1 GRAVIMETRICKÁ METODA

Gravimetrická metoda [12] je při měření vlhkosti považována za základní a definiční metodu, při níž se měří hmotnost vzorku před a po vysušení v sušárně při definované teplotě, kterou je nejčastěji teplota 105 °C až 110 °C. V případě, že by ohřev vzorku způsobil jeho rozklad, je sušení prováděno v exikátoru. Pro urychlení sušení se dále využívá snížení tlaku (vakuové sušení) či ohřev infračerveným zářením.

Chyby měření jsou nejčastěji způsobeny

- změnami vlhkosti při odběru a manipulaci se vzorkem,
- změnami hmotnosti vzorku zapříčiněné oxidací, chemickým rozkladem vzorku, a odstraněním těkavých látek,
- chybou vážení v důsledku tepelného vztlaku,
- hygrokopickým příjmem vody mezi sušením a druhým vážením,
- neúplným odstraněním vody ze vzorku (sušení končí v okamžiku, kdy nastává rovnováha mezi tlakem vodních par ve vzduchu a ve vzorku).

Nejistota měření gravimetrickou metodou se udává 0,01 % [05]. Za výhodu metody lze považovat, že se jedná o nejuniverzálnější a nejpřesnější metodu. Proto slouží velmi často ke kalibraci vlhkoměrů založených na relativních metodách měření. Naopak nevýhody metody lze shrnout do následujících bodů

- laboratorní metoda (nemožnost měření přímo na místě),
- destruktivní metoda (nemožnost opakování měření),
- pracná a zdlouhavá metoda,

- menší přesnost metody v oblasti měření malých vlhkostí,
- obtížnost získávání reprezentativních vzorků z heterogenního materiálu.

4.2 ELEKTRICKÉ METODY

Elektrické metody, využívající především vodivostní, kapacitní a mikrovlnné principy měření [04], [06], [33], jsou nejčastějšími polními metodami měření vlhkosti. Jejich základem je závislost parametrů, které charakterizují chování materiálu v elektrickém poli, na vlhkosti.

Vodivostní metoda při měření využívá závislost elektrického odporu materiálu, umístěného mezi dvěma elektrodami snímače, na vlhkosti.

Chybu měření nejčastěji způsobují

- změny teploty, hustoty, chemického a granulometrického složení materiálu,
- nedokonalý kontakt elektrod snímače s měřeným materiálem,
- polarizace elektrod při měření stejnosměrným proudem (netýká se metody EIS),
- heterogenita materiálu.

Nejistota měření se udává hodnotou 1,0 % [13], [21].

Za výhody vodivostních metod lze považovat skutečnost, že

- vlhkoměry jsou nenáročné na obsluhu a zpravidla ekonomicky ne příliš nákladné,
- metoda je vhodná pro použití v polních podmínkách,
- umožňuje využití dvou způsobů buzení elektrického pole v měřeném materiálu – využití stejnosměrného proudu je z hlediska dosažení vyšší přesnosti měření vhodné pro měření malé vlhkosti materiálu (např. u dřeva 10 % až 25 %), pro měření vyšších vlhkostí se využívá střídavý proud, neboť nedochází k polarizaci elektrod.

Za nevýhody vodivostních metod lze považovat

- poměrně značnou závislost výsledků měření na změně hustoty, teploty, chemického (především obsah solí) a granulometrického složení materiálu,
- pro jednotlivé druhy materiálu je nutné provést kalibraci měřidla,
- je nutné zabezpečit dokonalý kontakt mezi elektrodami snímače a měřeným materiálem,
- pro měření vlhkostí nižších než 5 % je metoda nepřesná a tedy nevhodná,
- při velkých vlhkostech dochází k saturaci, kdy další zvyšování vlhkosti představuje již jen velmi malou změnu měřeného elektrického odporu.

Kapacitní metoda využívá závislost relativní permitivity materiálu na jeho vlhkosti, měří se průměrná hodnota vlhkosti materiálu umístěného mezi elektrodami snímače. Dle [06] je nejistota měření 0,1 %. Chyby při měření způsobují

- změny teploty, hustoty, chemického a granulometrického složení materiálu,
- změny energie vazby vody,

- heterogenita materiálu.

Za výhody metody lze považovat

- rychlost a přesnost polního měření vlhkosti,
- není zcela nezbytný dokonalý kontakt obou elektrod snímače s měřeným materiálem,
- změny pH materiálu v rozmezí 2,7 až 6,7 a změny obsahu solí v materiálu nezpůsobují výraznou chybu měření [21],
- vysoká citlivost přístrojů, měření zohledňuje i vázanou vodu (relativní permitivita volné vody při 20 °C je 80,1, chemicky vázané vody je 4,5 až 5,8 [01] a vody vázané v mononukleární vrstvě 2,5 [11],
- do externí paměti vybraných kapacitních vlhkoměrů lze uložit až 99 kalibračních křivek [33].

Za nevýhodu lze považovat, že

- měřidlo vyžaduje kalibraci pro jednotlivé druhy materiálu,
- výsledky měření jsou závislé na hustotě a teplotě měřeného materiálu,
- měření vlhkosti sypkých materiálů vyžaduje konstantní stlačení měřeného vzorku materiálu a malé rozměry zrn.

Za určitou kombinaci metody vodivostní a kapacitní lze považovat ověřovanou metodu elektrické impedanční spektrometrie (EIS).

4.2.1 Komerčně dostupná zařízení

V České republice jsou v praxi pro detekci vlhkosti půdy realizována a užívána např. zařízení společnosti AMET-GEO s.r.o. Snímače půdní vlhkosti VIRRIB se vyrábějí buď jako kruhové nebo úzké (Obr. 4.1). Výhodou uvedených snímačů je relativně nízká cena, vysoká přesnost a stálost, prakticky nezávislost na druhu a typu zeminy, okamžitá odezva snímače na změny vlhkosti [29]. V některých případech může být nevýhodou snímačů měření pouze v jedné úrovni, kdy při instalaci často dochází k deformaci měřeného pórovitého prostředí.



Obr. 4.1 Snímače půdní vlhkosti VIRRIB

Zdroj: <http://www.amet.cz/virribcz.html>

4.3 ELEKTRICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE

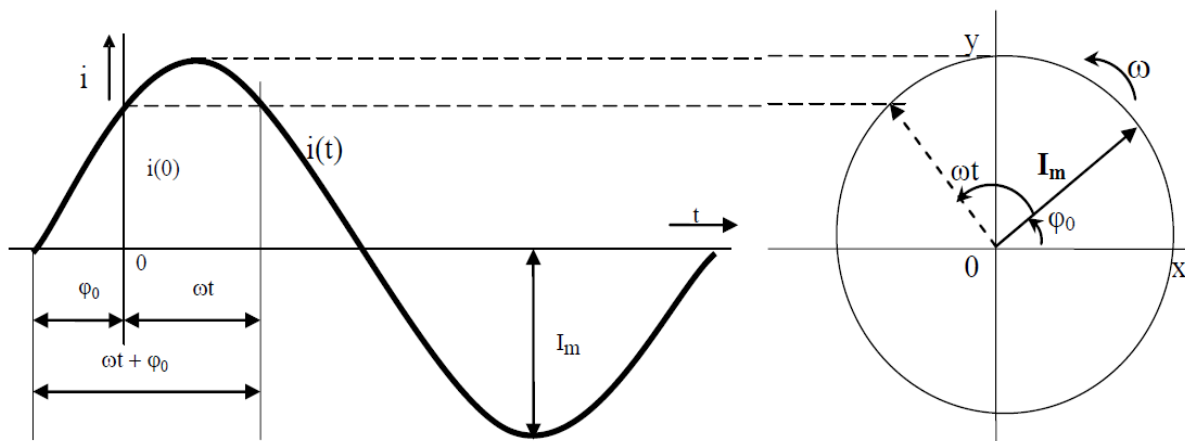
Elektrická impedanční spektrometrie (EIS) je nepřímá, kontaktní, impedanční, elektromagnetická měřicí metoda, která se používá pro sledování chemicko-fyzikálních charakteristik organických i anorganických materiálů [10].

EIS představuje citlivou metodu a experimentální techniku určenou ke stanovení parametrů sledovaného jevu a prostředí. Je založena na periodickém, zpravidla harmonickém budicím signálu, což společně s malou použitou amplitudou zabezpečuje minimální koncentrační změny u povrchu elektrody spojené s měřeným prostředím [20].

Principem metody EIS je měření frekvenční charakteristiky elektrické impedance Z zemin. Elektrická impedance Z je komplexní veličina popisující zdánlivý odpor pórovitého prostředí a fázový posuv elektrického napětí proti elektrickému proudu při průchodu harmonického střídavého elektrického proudu dané frekvence.

Pro určení elektrické impedance je potřeba zabývat se analýzou časových průběhů střídavého napětí a střídavého proudu [20]. Za střídavý signál lze považovat každý signál (harmonický, impulsní apod.), jehož směr se periodicky střídá. Předpokládá se harmonický střídavý signál, jehož ideální časový průběh lze popsat funkcí sinus. Střídavý proud vzniká v obvodu, který je připojen ke zdroji střídavého napětí.

Harmonické veličiny je možno graficky znázornit časovým průběhem (Obr. 4.2) nebo fázorovým diagramem, kde fázor je komplexní číslo vyjadřující časový vektor.



Obr. 4.2 Harmonický proud s počáteční fází a fázor proudu v rovině x, y

Zdroj: Monitorování proudění vody zeminou a možnosti jeho využití u ochranných hrází. [24]

Fázor proudu (Obr. 4.2) lze definovat jako orientovanou úsečku o délce rovné amplitudě harmonického proudu, která se otáčí konstantní rychlostí ω kolem počátku pravouhlé rovinné souřadnicové soustavy x, y [24]. V čase t je tento vektor otočen proti reálné ose o úhel $(\omega \cdot t + \varphi_0)$.

Jestliže elektrický odpor (rezistance) R rezistoru charakterizuje vlastnosti zemin (např. změna obsahu vody, teploty) v obvodu stejnosměrného proudu, elektrické impedance

\mathbf{Z} charakterizuje vlastnosti zemin v obvodech střídavého proudu [21]. U elektrické impedance může být průběh napětí s proudem fázově posunut dle charakteru reaktance.

Elektrickou impedanci lze vyjádřit Ohmovým vztahem pro střídavé obvody, tj. poměr fázoru elektrického napětí \mathbf{U} a fázoru elektrického proudu \mathbf{I}

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}} [\Omega], \quad (4.1)$$

a stejně jako v případě stejnosměrných obvodů jsou hodnoty elektrické impedance \mathbf{Z} a rezistance R vyjádřeny v ohmech $[\Omega]$.

Kmitočtovou charakteristiku elektrické impedance \mathbf{Z} lze vyjádřit jako funkci komplexní proměnné v algebraickém tvaru

$$\mathbf{Z} = R + jX [\Omega], \quad (4.2)$$

kde R je rezistance (elektrický obvod) tvořící reálnou část elektrické impedance, která nezávisí na kmitočtu. Imaginární složka elektrické impedance X je reaktance, která je závislá na kmitočtu [24].

Modul vektoru elektrické impedance, tedy absolutní hodnoty elektrické impedance, lze vyjádřit Pythagorovou větou

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} [\Omega], \quad (4.3)$$

kde jsou všechny uvedené veličiny vyjádřené v ohmech $[\Omega]$.

Při vyjádření reaktance, která má v případě zemin převážně kapacitní charakter (ovšem může být i indukčnostní) je třeba vycházet z úhlové rychlosti [10], která je dána vztahem

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} [\text{Hz}], \quad (4.4)$$

kde f je frekvence otáčivého pohybu $[\text{Hz}]$ a T je jeho perioda $[\text{s}]$

Fázový posuv φ se vyjadřuje pomocí inverzní funkce k funkci tangens poměrem imaginární a reálné složky elektrické impedance [24]

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right) [-]. \quad (4.5)$$

Měrný (specifický) elektrický odpor (rezistivita) ρ' je materiálová konstanta, která charakterizuje elektrickou vodivost látky [28], je dána vztahem

$$\rho' = R \cdot \frac{A}{l} [\Omega \cdot \text{m}], \quad (4.6)$$

kde R je elektrický odpor $[\Omega]$, A je plocha elektrického vodiče reprezentovaného prostředím a vycházející z rozměrů použité elektrody $[\text{m}^2]$ a l je vzdálenost elektrod $[\text{m}]$.

Admittance \mathbf{Y} popisuje zdánlivou vodivost materiálu a fázový posuv napětí proti proudu při průchodu harmonického střídavého elektrického proudu dané frekvence. Je dána inverzní hodnotou elektrické impedance [24]

$$\mathbf{Y} = \frac{1}{\mathbf{Z}} [\text{S}] \quad (4.7)$$

a je vyjádřena v jednotkách Siemens [S].

Admittanci \mathbf{Y} lze vyjádřit obdobným zápisem jako elektrickou impedanci pomocí reálné části (konduktance) G , která vyjadřuje schopnost vodiče tvořeného materiálem mezi měřicími elektrodami snímače vést elektrický proud a imaginární složky představované susceptancí B , která představuje zdánlivou elektrickou vodivost [20]

$$\mathbf{Y} = G + j \cdot B [\text{S}], \quad (4.8)$$

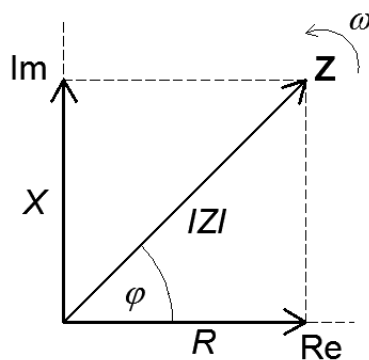
kde konduktance i susceptance jsou vyjádřeny v jednotkách Siemens [S].

Konduktivita, která popisuje schopnost látky vést elektrický odpor je dána inverzní hodnotou rezistivity [28]

$$\sigma = \frac{1}{\rho} [\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}]. \quad (4.8)$$

Je-li hodnota konduktivity vysoká, je materiál dobrým elektrickým vodičem, což odpovídá jeho vysokému stupni nasycení vodou [20].

Fázor elektrické impedance \mathbf{Z} , je možno vyjádřit i graficky (Obr. 4.3) pomocí fázoru \mathbf{U} a \mathbf{I} .



Obr. 4.3 Grafické znázornění elektrické impedance

Zdroj: Aplikace metody EIS při monitorování hydrologických jevů [20]

Z charakteristiky je zřejmá možnost zápisu elektrické impedance \mathbf{Z} v goniometrickém tvaru (zobrazení elektrické impedance v komplexní Gaussově rovině)

$$\mathbf{Z} = |\mathbf{Z}| \cdot \cos \varphi + j \cdot |\mathbf{Z}| \cdot \sin \varphi, \quad (4.9)$$

Materiál lze popsat elektrickou impedancí ekvivalentního elektrického obvodu tvořeného kombinací rezistoru, induktoru a kapacitoru. Jejich zapojení v obvodu je možné sériové (pro všechny prvky obvodu je společný fázor proudu) nebo paralelní (pro všechny prvky obvodu je společný fázor napětí), které se pro měření pórovitých materiálů ukázalo vhodnějším [24].

Ke stanovení elektrické impedance materiálu byly realizovány měřicí přístroje s názvem Z-metr (příklad Obr. 4.4) s příslušenstvím. Měřicí přístroj Z-metr I je sestaven pro měření pouze v laboratorních podmínkách, přístroje Z-metr II až IV jsou sestaveny pro měření jak v laboratorních, tak v polních podmínkách. Pro svůj experiment jsem využila měřicí přístroj Z-metr třetí a čtvrté vývojové řady, který je uveden v kapitole 6.



Obr. 4.4 Příklad typové řady Z-metr (Z-metr I, II a IIa)

Zdroj: Aplikace metody EIS při monitorování hydrologických jevů [20]

5 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE Z-METR

Pro experiment byly použity aparatury s přístroji Z-metr III a IV, které byly navrženy pro měření elektrické impedance zemin metodou elektrické impedanční spektrometrie. Měřicí aparatura se skládá z měřicího přístroje Z-metru, měřicích sond s kabely a zdroje elektrického střídavého proudu. Základní parametry použitých přístrojů Z-metr jsou uvedeny v Tab. 5.1.

Tab. 5.1 Základní parametry měřicích přístrojů Z-metr

Parametr	Z-metr III	Z-metr IV v.0	Z-metr IV
Impedanční rozsah	100 Ω - 1 M Ω	10 Ω - 1 M Ω	10 Ω - 1 M Ω
Frekvenční rozsah	1 kHz – 100 kHz	100 kHz – 200 kHz	100 kHz – 200 kHz
Úroveň napětí	1,0 V	0,2 V – 4,0 V	0,2 V – 4,0 V
Přesnost měření modulu Z	± 2 % z rozsahu	± 2 % z rozsahu	± 2 % z rozsahu
Přesnost měření fáze	$\pm 2^\circ$	$\pm 2^\circ$	$\pm 2^\circ$
Komunikační rozhraní	USB, SD karta	USB, SD karta, Ethernet, Bluetooth	USB, SD karta, Ethernet, Bluetooth
Počet měřicích míst	1, 8, 16, 32, 64, 128	1, 8, 16, 32, 64, 128, 256	1, 8, 16, 32, 64, 128, 256
Přepínač	interní, externí	interní, externí	interní, externí
Napájení	baterie	baterie	baterie

5.1 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ Z-METR III

Přístroj Z-metr III (Obr. 5.1) je v řadě již třetí generací přístroje, který byl navržen a realizován řešením mezinárodních projektů EUREKA.



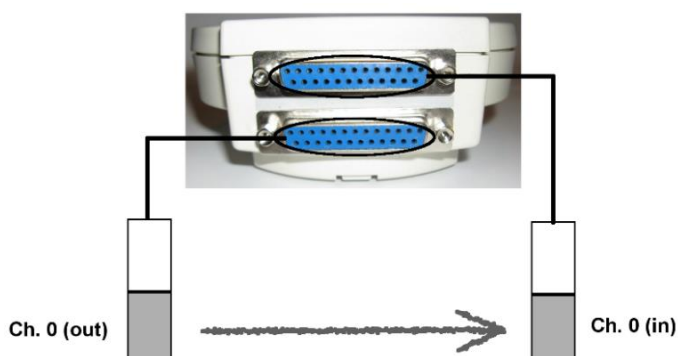
Obr. 5.1 Měřicí přístroj Z-metr III

Ústřední jednotkou měřicího přístroje Z-metr III je 32 bitový procesor firmy ST Microelectronics, který umožňuje pouze dvousvorkové a třísvorkové měření [09]. Hlavním zdrojem energie je baterie typu Li-Ion s kapacitou 7Ah. Při normálním používání je výdrž baterie přibližně 24 hodin.

Pro komunikaci s uživatelem je přístroj Z-metr III vybaven klávesnicí a LC displejem. Všechna nastavení se ovládají pomocí klávesnice z uživatelského menu. Pro měření je možné využít pouze pevně nastavenou amplitudu generovaného signálu $U = 1 \text{ V}$.

Všechna nastavení a naměřená data se ukládají do paměti flash, standardní SD karty se souborovým systémem FAT. Karta SD je uložena v těle přístroje a je uživatelsky vyměnitelná. Na SD kartě je také uložena licence měřicího přístroje, která slouží také jako hardwarový klíč. Operace na SD kartě se provádějí přes USB rozhraní nebo vyjmutím SD karty a jejím vložením do čtečky paměťových karet [07].

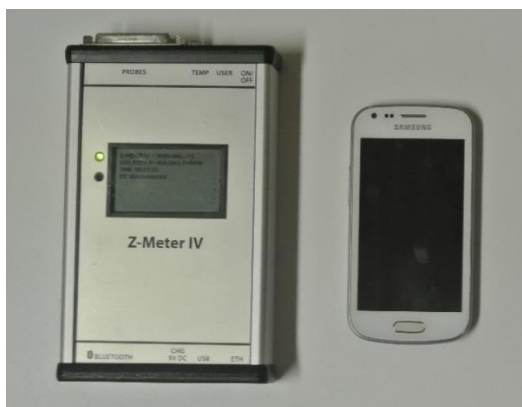
Na těle Z-Metru III jsou k dispozici dva konektory (Obr. 5.2) typu CANON 25 PIN, které slouží k připojení měřicích sond [24].



Obr. 5.2 Konektory pro připojení měřicích sond (Z-metr III)

5.2 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ Z-METR IV V.0

Přístroj Z-metr IV v.0 (Obr. 5.3) je v řadě již čtvrtou generací přístroje, který byl navržen a realizován řešením mezinárodního projektu E!7614 v programu EUREKA. Čtvrtá generace přístroje Z-metr umožňuje bezdrátovou komunikaci s uživatelem, ve vývojové verzi nula se uskutečňuje pomocí „chytrého telefonu“ s operačním systémem android.



Obr. 5.3 Měřicí přístroj Z-metr IV v.0

Ústřední jednotkou měřicího přístroje Z-metr IV v.0 je 32 bitový výkonný mikroprocesor s jádrem Cortex-M3. Hlavním zdrojem energie jsou dvě průmyslové baterie typu Li-Ion, které mají nízkou hmotnost, vysoký výkon a krátkou dobu dobíjení [10]. Při intenzivním používání je výdrž baterie přibližně 24 hodin. Nabíjení baterie je možné přes zdroj o 5V/1A napájecího adaptéru.

Hlavním rozhraním přístroje je rozhraní Bluetooth, které umožňuje připojení k ovládání přístroje Z-metr IV v.0 a k datové manipulaci. Pro budoucí připojení je zde výstup na Ethernet a přístroj je také možné stavět u GPRS a Wi-Fi modelů.

Pro komunikaci s uživatelem je přístroj Z-metr IV v.0 vybaven pouze LC displejem. Klávesnice byla přemístěna ze Z-metru do „chytrého (dotykového) telefonu“. Aplikace v inteligentním telefonu umožňuje spustit různé typy opatření, nastavení parametrů opatření a některé manipulace s daty. Velkou výhodou této verze přístroje je možnost ovládání přístroje na dálku.

Všechna nastavení a naměřená data se ukládají do paměti flash, standardní mikro SD karty. Karta SD je zabudovaná v přístroji a není uživatelsky vyměnitelná. Operace na mikro SD kartě se provádějí přes USB rozhraní a přes Bluetooth. Zařízení může být připojeno přes USB k libovolnému počítači s operačním systémem Microsoft Windows nebo Linux [10].

Na těle Z-metru IV v.0 jsou k dispozici dva konektory (Obr. 5.4), které slouží k připojení měřicích sond.



Obr. 5.4 Konektory pro připojení měřicích sond (Z-metr IV v.0)

5.3 MĚŘICÍ PŘÍSTROJ Z-METR IV

Přístroj Z-metr IV (Obr. 5.5) je v řadě již čtvrtou generací přístroje, který byl navržen a realizován řešením mezinárodního projektu E!7614 programu EUREKA.



Obr. 5.5 Měřicí přístroj Z-metr IV

Ústřední jednotkou měřicího přístroje Z-metr IV je 32 bitový výkonný mikroprocesor s jádrem Cortex-M3. Hlavním zdrojem energie jsou dvě průmyslové baterie typu Li-Ion, které mají nízkou hmotnost, vysoký výkon a krátkou dobu dobíjení. Při intenzivním používání je výdrž baterie přibližně 24 hodin. Nabíjení baterie je možné přes zdroj o 5V/1,5A napájecího adaptéru nebo přes USB port [10].

Hlavním bezdrátovým rozhraním přístroje je rozhraní Bluetooth, které umožňuje připojení přístroje Z-metr IV k ovládání a k datové manipulaci. Pro budoucí připojení je zde rozšíření pro připojení mnoha rozhraní např. GSM, Wi-Fi modelů, LAN, obecné vstupy a výstupy.

Pro komunikaci s uživatelem je přístroj Z-metr IV vybaven klávesnicí a LC displejem. Měřicí přístroj Z-metr IV je možné ovládat pomocí klávesnice nebo prostřednictvím „chytrého telefonu“ přes Bluetooth v základním provedení [06].

Všechna nastavení a naměřená data se ukládají do paměti flash, standardní mikro SD karty. Karta SD je zabudovaná v přístroji a není uživatelsky vyměnitelná. Operace na mikro SD kartě se provádějí přes USB rozhraní a přes Bluetooth. Zařízení může být připojeno přes USB k libovolnému počítači s operačním systémem Microsoft Windows nebo Linux [06].

Na těle Z-metru IV jsou k dispozici dva konektory (Obr. 5.6), které slouží k připojení měřicích sond.

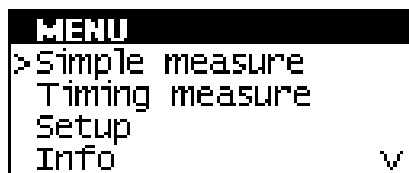


Obr. 5.6 Konektory pro připojení měřicích sond (Z-metr IV)

5.4 NASTAVENÍ PARAMETRŮ PŘÍSTROJŮ Z-METR

Před zahájením každého měření je důležité nastavit jednotlivé parametry přístroje. Práce s přístroji Z-metr je jednoduchá, intuitivní a komfortní.

Po zapnutí měřicího přístroje Z-metr tlačítkem ON se zobrazí nabídka uživatelského menu (Obr. 5.7). Výjimkou je měřicí přístroj Z-metr IV v.0, který je po zapnutí nutné spárovat s „chytrým (dotykovým) telefonem“ přes rozhraní Bluetooth. Po spárování se rovněž zobrazí nabídka uživatelského menu.



Obr. 5.7 Příklad uživatelského menu

V uživatelském menu se nastaví všechny požadované parametry měření. Jako první se volí buď jednorázové měření (simple measure) bez záznamu měřených dat na SD kartu, nebo časové měření (timing measure), při němž jsou data na SD kartu zaznamenávána. Pro experiment jsem

volila časové měření, u kterého se musely nastavit jednotlivé parametry měření (Obr. 5.8). Mezi tyto parametry patří režim měření, což znamená vybrat, jestli bude použita jedna tyčová sonda (single probe), kdy jsou elektrody snímače propojeny ve třísvorkovém uspořádání na jedné měřicí tyči (při měření je nutno použít adaptér) nebo jedna párová sonda (1 probe pair), kdy jsou elektrody snímače propojeny ve dvousvorkovém uspořádání na dvou paralelně umístěných tyčích. Dále se volí počet kanálů (channels), měřicí frekvence (frequency), zpoždění mezi zahájením a skutečným sejmutím naměřené hodnoty (setting), zpoždění mezi jednotlivými měřeními (delay) a jako poslední je nutné nastavit počet opakování sady měření (count).

TIMING MEASURE	CHANNEL:
>Mode: single probe	value: 5
Channels: 1	
Start f. [Hz]: 0	
End f. [Hz]: 0	

Obr. 5.8 Příklad nastavení parametrů měření

Před zahájením měření se musí všechny nastavené parametry měření uložit (Obr. 5.9), až poté může být spuštěno samotné měření. Před spuštěním měření musí být zadán název výstupního souboru (Obr. 5.9), který se zadává pomocí opakovaného mačkání tlačítek na klávesnici. Měření je zahájeno po stisknutí tlačítka OK nebo SCAN u přístroje Z-metr III, Measure u přístroje Z-metr IV nebo tlačítka ENTER u přístroje Z-metr IV. Průběh měření (Obr. 5.9) je zobrazován na displeji Z-metru nebo „chytrého telefonu“, takže už během měření je možné kontrolovat jeho průběh.

SAVE SETTINGS!	FILENAME	MEASURE!
Saved OK.	text: test1	2: 12.3M -21.3M 3: 12.5M -23.2M 4: 13.4M -22.0M Finish.

Obr. 5.9 Příklad uložení nastavení, názvu výstupního souboru a záznamu měření

Po dokončení měření jsou data ukládána na vloženou paměťovou kartu. Všechny naměřené hodnoty se ukládají ve formě textového souboru nebo ve formátu *txt nebo *csv. Příklad výstupních dat je zřejmý z Obr. 5.10. Výstupní soubor obsahuje všechna důležitá data z měření, jako je číslo měření (*No*), měřicí frekvence (*f*), datum měření (*date*), čas měření (*time*), číslo měřeného kanálu (*ch*), měřicí rozsah přístroje (*range*) a hodnoty reálné (R_x) a imaginární (X_x) složky měřené elektrické impedance.

Start at 17.4.2015 9:47:21

No	f [Hz]	date [dd.mm.yyyy]	time [hh:mm:ss]	ch	range	Rx [ohm]	Xx [ohm]
0	2000	17.04.2015	9:47:21	0	5	3382853	-1049991
1	2000	17.04.2015	9:47:22	1	5	3626013	-1478515
2	2000	17.04.2015	9:47:22	2	5	3802279	-1551258
3	2000	17.04.2015	9:47:22	3	5	3644505	-1190151
4	2000	17.04.2015	9:47:22	4	5	3613277	-1241288
5	2000	17.04.2015	9:47:23	5	5	3478346	-1147482
6	2000	17.04.2015	9:47:23	6	5	3679923	-1445152
7	2000	17.04.2015	9:47:23	7	5	3465519	-1065268

Obr. 5.10 Příklad výstupních dat

6 ZAŘÍZENÍ POUŽITÁ PŘI MĚŘENÍ

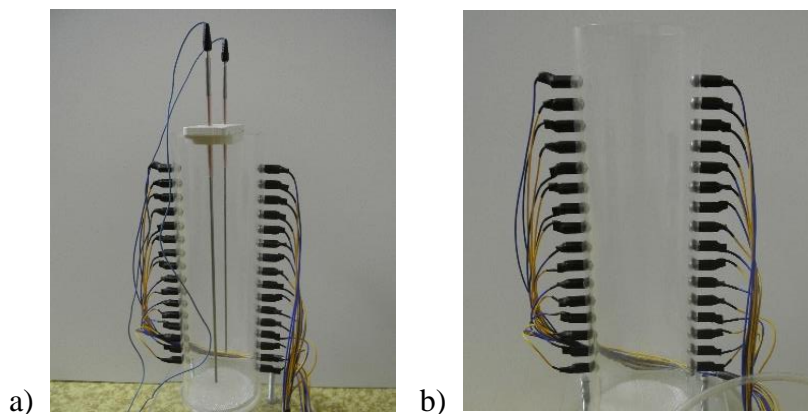
Cílem mé práce bylo měření zbytkové vlhkosti v pórovitém prostředí nepřímou měřicí metodou elektrické impedanční spektrometrie. Naměřené hodnoty zbytkové vlhkosti pomocí metody EIS byly porovnány s výpočty stanovenými na základě vážení. Experiment byl proveden v laboratoři Ústavu vodních staveb, kde byly vytvořeny vhodné podmínky pro jeho provedení. K realizaci experimentu byly použity měřicí přístroje typové řady Z-metr (Obr. 6.1) s párovými sondami.



Obr. 6.1 Měřicí aparatura pro metodu EIS (Z-metr III, Z-metr IV v.0 a Z-metr IV)

6.1 MĚŘICÍ SONDY

Sběr informací o měřeném prostředí zprostředkovává měřicí sonda. Pro experiment byla použita invazivní sonda tvořená 2 paralelními nerezovými tyčemi průměru 0,004 m a délky 0,300 m, která byla umístěna přímo do měřicího válce (Obr. 6.2a) s testovaným materiálem. Vzdálenost mezi tyčemi byla $l = 0,080$ m, v textu je sonda označena jako tyčová sonda.



Obr. 6.2 Měřicí sondy (a – tyčová sonda, b – soubor bodových sond)

Druhý systém, který jsem pro měření použila, byl soubor 16 neinvazivních bodových sond (Obr. 6.2b), které byly zhotoveny z nerezavějících šroubů průměru 0,011 m. Bodové sondy byly souměrně umístěny po obou stranách měřicího válce tak, že vzdálenost mezi aktivními plochami protilehlých elektrod byla $l = 0,095$ m. Jednu sondu představovala dvojice elektrod umístěných ve stejné výškové úrovni a reprezentovala jeden měřicí kanál. Měřicí kanály byly číslovány ode dna válce se zkoumaným vzorkem materiálu směrem vzhůru. 16 bodových sond je v textu dále označeno jako soubor bodových sond.

Zapojení sond bylo v obou případech provedeno jako párové. Obě sondy byly řešeny jako pasivní, což znamená, že nemají vlastní zdroj energie. Z důvodu eliminace vlivu parazitních odporů okolního prostředí byly příslušné části sond izolovány elektricky nevodivou smršťovací hadicí.

Charakteristické parametry invazivní tyčové sondy jsou uvedeny v Tab. 6.1 a souboru neinvazivních bodových sond v Tab. 6.2

Tab. 6.1 Invazivní tyčová sonda – charakteristické parametry

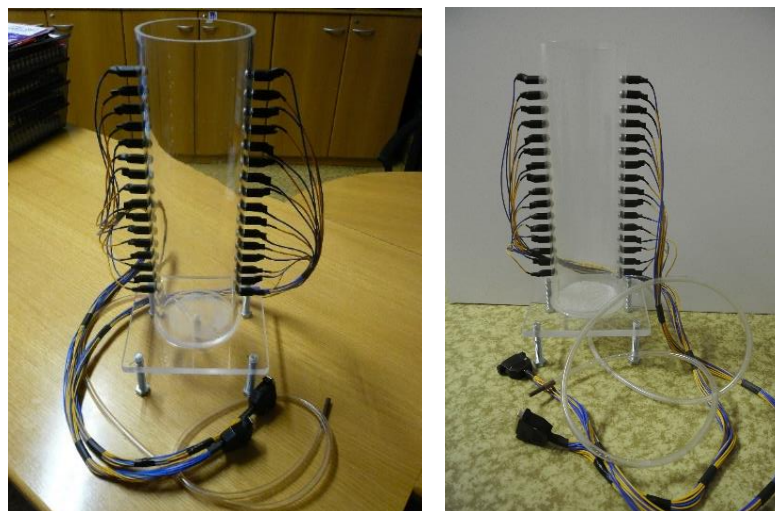
Počet sond	2	ks
Počet měřicích kanálů	1	-
Celková délka sondy	0,030	m
Průměr sondy	0,004	m
Vzdálenost sond od stěny válce	0,015	m
Vzdálenost mezi tyčemi sondy	0,080	m

Tab. 6.2 Soubor neinvazivních bodových sond – charakteristické parametry

Počet elektrod	32	ks
Počet měřicích kanálů (párových sond)	16	-
Průměr elektrody	0,011	m
Vzdálenost mezi měřicími kanály	0,020	m
Vzdálenost mezi elektrodami sondy	0,095	m

6.2 MĚŘICÍ VÁLEC

Pro experiment byl navržen a vyroben speciální měřicí válec (Obr. 6.3). Ve dně měřicího válce byl proveden otvor průměru 0,010 m, do kterého byl umístěn výpustní otvor resp. vypouštěcí hadice, která sloužila pro volný odtok vody.



Obr. 6.3 Měřicí válec

Parametry měřicího válce jsou uvedeny v Tab. 6.3.

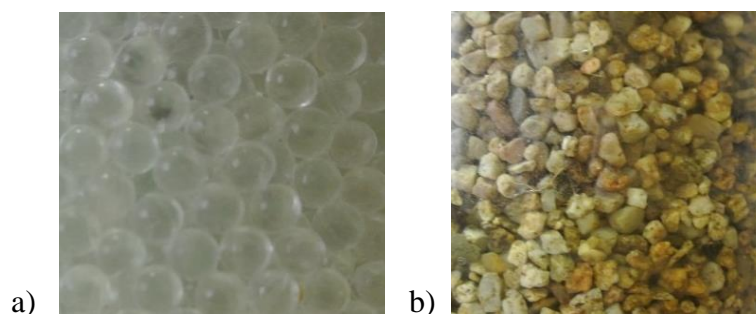
Tab. 6.3 Měřicí válec – charakteristické parametry

Materiál válce	organické sklo	-
Tloušťka stěny válce	0,010	m
Průměr válce	0,130	m
Výška válce	0,395	m
Médium	pitná voda	-

Rozměry válce jsou uvedeny i s tloušťkou stěny.

6.3 POUŽITÝ MATERIÁL

Při experimentu byly pro realizaci homogenního pórovitého prostředí použity materiály dostupné v laboratoři Ústavu vodních staveb. Použitým materiálem byly skleněné kuličky (Obr. 6.4a) o rozměrech 0,001 m, 0,002 m, 0,004 m a 0,006 m a zaoblená zrna zeminy – frakce bratčického písku (Obr. 6.4b) o rozměrech 0,001 m, 0,002 m a 0,004 m.



Obr. 6.4 Použitý materiál (a – skleněné kuličky, b – zrna zeminy)

6.3.1 Skleněné kuličky

Z každé rozměrové varianty bylo náhodně vybráno 250 skleněných kuliček (Obr. 6.5), jejichž průměr byl stanoven digitálním posuvným měřidlem. Z měření byla stanovena minimální hodnota, maximální hodnota, průměrná hodnota a maximální rozdíl, které jsou vypsány v Tab. 6.4. Také byla stanovena jejich hmotnost a objem.

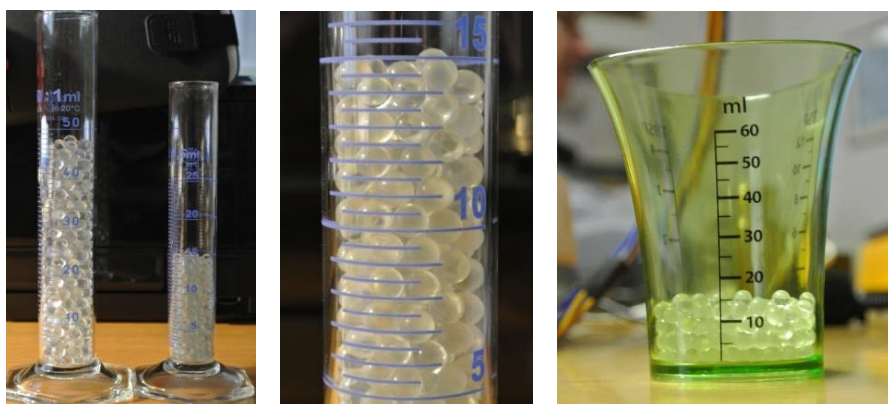


Obr. 6.5 Skleněné kuličky (0,001 m, 0,002 m, 0,004 m a 0,006 m)

Tab. 6.4 Základní charakteristické hodnoty – skleněné kuličky

Rozměr kuliček	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Průměr kuliček	Maximální rozdíl	Hmotnost	Objem
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kg]	[m ³]
0,001	$0,73 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$0,91 \cdot 10^{-3}$	$0,34 \cdot 10^{-3}$	0,0003	$5,2 \cdot 10^{-10}$
0,002	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$2,23 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$0,44 \cdot 10^{-3}$	0,0028	$4,2 \cdot 10^{-9}$
0,004	$3,77 \cdot 10^{-3}$	$4,19 \cdot 10^{-3}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$0,42 \cdot 10^{-3}$	0,0211	$3,4 \cdot 10^{-8}$
0,006	$5,69 \cdot 10^{-3}$	$6,12 \cdot 10^{-3}$	$5,93 \cdot 10^{-3}$	$0,43 \cdot 10^{-3}$	0,0690	$1,1 \cdot 10^{-7}$

Ze stanovené hmotnosti a objemu (Obr. 6.6) dané varianty byla vypočítána její hustota (Tab. 6.5), která byla korelována s hodnotou hustoty stanovenou gravimetrickou metodou.



Obr. 6.6 Stanovení objemu – skleněné kuličky

Tab. 6.5 Stanovení hustoty skleněných kuliček

Průměr kuliček [m]	0,001	0,002	0,004	0,006
Počet kuliček [-]	250	250	250	250
Hmotnost kuliček [kg]	0,0003	0,0028	0,0211	0,0690
Hmotnost jedné kuličky [kg]	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
Objem kuličky [m ³]	$5,2 \cdot 10^{-10}$	$4,2 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Hustota [kg·m ⁻³]	2139	2674	2518	2440

6.3.2 Zrna zemina

Z každé rozměrové varianty bylo náhodně vybráno 250 zrn zeminy (zaoblená zrna vybraných frakcí bratčického písku – Obr. 6.7), jejichž rozměry byly změřeny digitálním posuvným měřidlem ve třech směrech x , y , z . Z rozměrů byla stanovena minimální hodnota, maximální hodnota, průměrná hodnota a maximální rozdíl, které jsou uvedeny v Tab. 6.6. Také byla stanovena jejich hmotnost a objem.

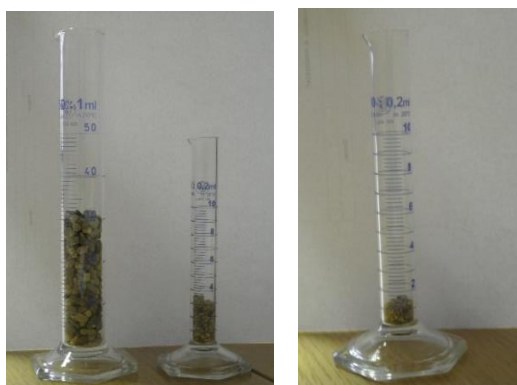


Obr. 6.7 Zrna zeminy (0,001 m, 0,002 m a 0,004 m)

Tab. 6.6 Základní charakteristické hodnoty – zrna zeminy

Rozměr kuliček	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Průměr kuliček	Maximální rozdíl	Hmotnost	Objem
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kg]	[m ³]
0,001	$0,45 \cdot 10^{-3}$	$4,36 \cdot 10^{-3}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-3}$	0,0016	$5,2 \cdot 10^{-10}$
0,002	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$5,54 \cdot 10^{-3}$	$2,40 \cdot 10^{-3}$	$4,77 \cdot 10^{-3}$	0,0047	$4,2 \cdot 10^{-9}$
0,004	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$10,74 \cdot 10^{-3}$	$5,25 \cdot 10^{-3}$	$9,14 \cdot 10^{-3}$	0,0417	$3,4 \cdot 10^{-8}$

Ze stanovené hmotnosti a objemu (Obr. 6.8) dané varianty byla vypočítaná její hustota (Tab. 6.7), která byla korelována s hodnotou hustoty stanovenou gravimetrickou metodou.



Obr. 6.8 Stanovení objemu – zrna zeminy

Tab. 6.7 Stanovení hustoty zrn zeminy

Průměr kuliček [m]	0,001	0,002	0,004
Počet kuliček [-]	250	250	250
Hmotnost kuliček [kg]	0,0016	0,0047	0,0417
Hmotnost jedné kuličky [kg]	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Objem kuličky [m ³]	$5,2 \cdot 10^{-10}$	$4,2 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$
Hustota [kg·m ⁻³]	6112	4460	4976

6.4 OSTATNÍ POMŮCKY

Pro experiment byl dále použit měřicí přístroj **Testo 454** (Obr. 6.9) s vnějším odporovým teploměrem a vlhkoměrem pro měření teploty a vlhkosti okolního prostředí a teploty vody. Při použití přístroje Testo 454 bylo měření provedeno polovodičovým perličkovým termistorem s

přesnosti měření $\pm 0,1$ °C při citlivosti přístroje 0,1 mV/Digit a elektrickým odporovým fóliovým tenzometrem. **Třepačka** (Obr. 6.9), která byla použita pro hutnění vybraného materiálu v měřicím válci. **Digitální váha Sartorius excellence E12000S** (Obr. 6.9) s váživostí do 12 100 g, citlivostí 0,1 g, standardní odchylkou $\leq \pm 0,05$ g a max. linearitou $\leq \pm 0,1$ g. Váha byla použita pro zaznamenávání důležitých váhových dat během celého experimentu.



Obr. 6.9 Testo 454, třepačka a digitální váha

Dále bylo použito délkové měřidlo - **svinovací metr** (Obr. 6.10), kterým se měřily rozměry měřicího válce, vzdálenost mezi jednotlivými sondami a výška materiálu ve válci. **Posuvné digitální měřidlo Stainless Hardened** (Obr. 6.10), kterým se měřily průměry sond, průměr válce a rozměry použitých materiálů (skleněných kuliček, zrn zeminy). Pro vsypání materiálu do měřicího válce byl použitý **trychtýř** (Obr. 6.10) různé velikosti s ohledem na velikost materiálu.



Obr. 6.10 Svinovací metr, digitální měřidlo a trychtýře

Dále byla použita **kádinka** (Obr. 6.11), jíž byl dávkován požadovaný objem vody do měřicího válce. **Odsávačka** (Obr. 6.11), která byla použita pro odsání vody zůstávající ve dně měřicího válce po gravitačním odvodnění. Celý průběh experimentu byl zaznamenán do **zápisníku** a zdokumentován pomocí **digitálního fotoaparátu Nikon 1 model J1 Double zoom** (Obr. 6.11).



Obr. 6.11 Kádinka, odsávačka a digitální fotoaparát

7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Vyhodnocení experimentu je provedeno v následujících krocích:

- frekvenční analýza testovaných materiálů pro stanovení měřicí frekvence,
- korelace výsledků frekvenční analýzy se závěry dosud provedených měření,
- stanovení zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí dle geotechnických postupů a gravimetrickou metodou,
- stanovení zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí metodou EIS.

7.1 FREKVENČNÍ ANALÝZA

Na základě frekvenční analýzy je možné stanovit měřicí frekvenci, při které je dosaženo maximální citlivosti měření. Ke stanovení frekvenční analýzy byly použity přístroje Z-metr, u kterých byl nastaven rozsah frekvenčního spektra v rozmezí od 2 000 Hz do 100 000 Hz s krokem 2 000 Hz. Další nastavené parametry přístroje Z-metr jsou patrné z Tab. 7.1.

Tab. 7.1 Nastavení parametrů přístroje Z-metr

Režim měření		párová sonda	-
Počet měřicích kanálů	tyčová sonda	1	-
	soubor bodových sond	16	-
Měřicí frekvence	Počáteční frekvence	2 000	Hz
	Konečná frekvence	100 000	Hz
	Krok frekvence	2 000	Hz
Amplituda generovaného signálu		1,0	V
Doba vzorkování		100	ms
Zpoždění vzorkování		500	ms
Počet opakování		1	-

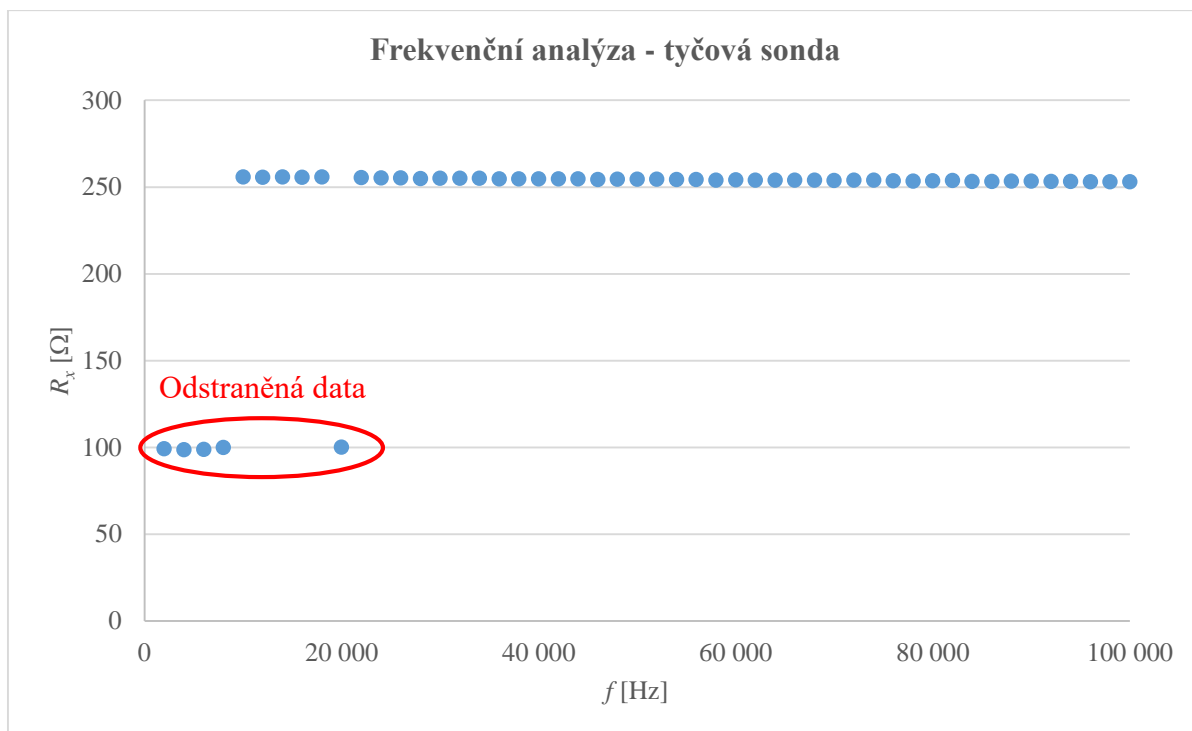
Frekvenční analýza byla provedena pro všechny vzorky použitých materiálů. Práce jsem realizovala v laboratorních podmínkách Ústavu vodních staveb, kde se teplota vzduchu t_{vz} při všech měřeních pohybovala v rozmezí od 20,5 °C do 24,0 °C a vlhkost vzduchu w_{vz} se pohybovala v rozmezí od 42,0 % do 57,0 %. Na základě poznatků z měření provedených přístroji Z-metr je možné konstatovat, že 4 % změna teploty okolního prostředí může způsobit změnu hodnoty měřené elektrické impedance v jednotkách Ω a až 14 % odlišnost vlhkosti vzduchu v jednotlivých dnech měření maximálně desítkách Ω měřené elektrické impedance. Vzhledem k době trvání frekvenční analýzy vzorků materiálu, která pro jeden vzorek byla max. 3 min a vzhledem ke skutečnosti, že vzorky materiálů byly od okolního prostředí izolovány stěnou měřicího válce, je možné konstatovat, že vliv teploty a vlhkosti obklopujícího prostředí lze při mém experimentu zanedbat.

Do měřicího válce (Obr. 6.3) byl nasypán materiál nad nejvyšší měřicí kanál souboru bodových sond. Tento materiál byl následně zatížen pitnou vodou, která byla odebrána z vodovodního řádu a teplota vody t_v se pohybovala v rozmezí od 20,0 °C do 21,0 °C. Tento parametr byl v jednotlivých dnech měření důsledně sledován, neboť se jednalo o tekutinu, kterou se vzorky testovaných materiálů zatěžovaly. Je známa skutečnost, že rozpustnost kyslíku ve vodě závisí na teplotě. Teplejší voda dokáže vázat menší množství kyslíku. Maximální množství rozpuštěného kyslíku ve vodě při normálním tlaku při 20 °C je 9,1 mg/l [26]. Teplota 20 °C je v mnoha experimentech považována za teplotu referenční, proto jsem ji volila jako teplotu zatěžovacího média.

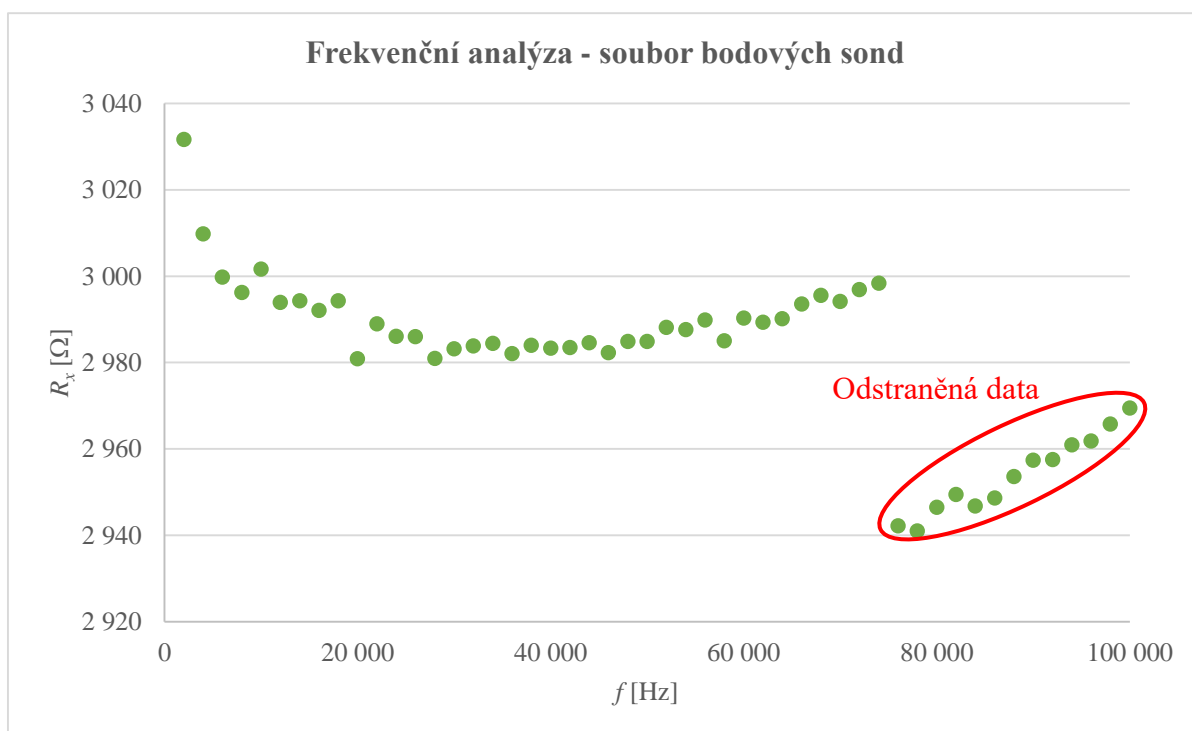
Dále je známo, že kyslík do vody difunduje ze vzduchu a rychlost difúze závisí na velikosti povrchu, přes který k difúzi dochází. Vzhledem k tomu, že povrch v měrném válci kromě vody tvoří i testovaný materiál, nelze předpokládat výraznější difúzi kyslíku do vzorku. Na druhou stranu, vyšší obsah rozpuštěného kyslíku ve vodě způsobuje změnu měřených elektrických parametrů testovaného vzorku (voda je horším elektrickým vodičem), a tedy ovlivňuje výsledek experimentu. Měření frekvenční analýzy bylo provedeno jak pro soubor bodových sond, tak pro tyčovou sondu.

Před vyhodnocením frekvenční analýzy byla některá data odstraněna. Jednalo se o data, která vykazovala větší odchylku než ± 5 % od průběhu středních hodnot křivek stanovených frekvenční analýzou. Uvedená hranice pro odchylku byla navázána na přesnost použitých Z-metrů při vyhodnoceném měřicím rozsahu. „Špatná“ data mohla být zapříčiněna např. ulpěním zrna testovaného materiálu na sondě EIS (tento jev se vyskytl častěji při měření se skleněnými kuličkami), chybou měřicího přístroje Z-metr (Obr. 7.1 a Obr. 7.2), kdy především Z-metr ovládaný přes mobilní telefon se v několika případech nepodařilo spustit současně s experimentem či dalšími vlivy (nepozornost měřiče, nedodržení postupu přípravy testovaného vzorku apod.).

Cílem frekvenční analýzy bylo stanovit měřicí frekvenci pro jednotlivé zkoumané vzorky materiálů. Sledován byl především vliv přípravy vzorků materiálů, a to z hlediska jejich hutnění a zatížení vodou, zhutnění materiálu před či po jeho zatížení vodou. Na základě provedené frekvenční analýzy bylo u souboru bodových sond rozhodnuto měřicí frekvenci stanovit jako aritmetický průměr měřicích frekvencí stanovených v jednotlivých úrovních s vyloučením nejnižší a nejvyšší úrovně z důvodu jejich ovlivnění při manipulaci se vzorkem. Měřicí frekvence je taková frekvence, při níž obě měřené veličiny (rezistance R_x i reaktance X_x) vykazují maximum. Pokud byla frekvenční analýza měřena bodovými sondami před a po zhutnění materiálu, byla výsledná měřicí frekvence rovněž stanovena aritmetickým průměrem odpovídajících hodnot. Tento postup byl zvolen i s ohledem na výsledky měření zjištěné tyčovou sondou, kdy byla ve výsledku obsažena větší plocha testovaného vzorku materiálu.

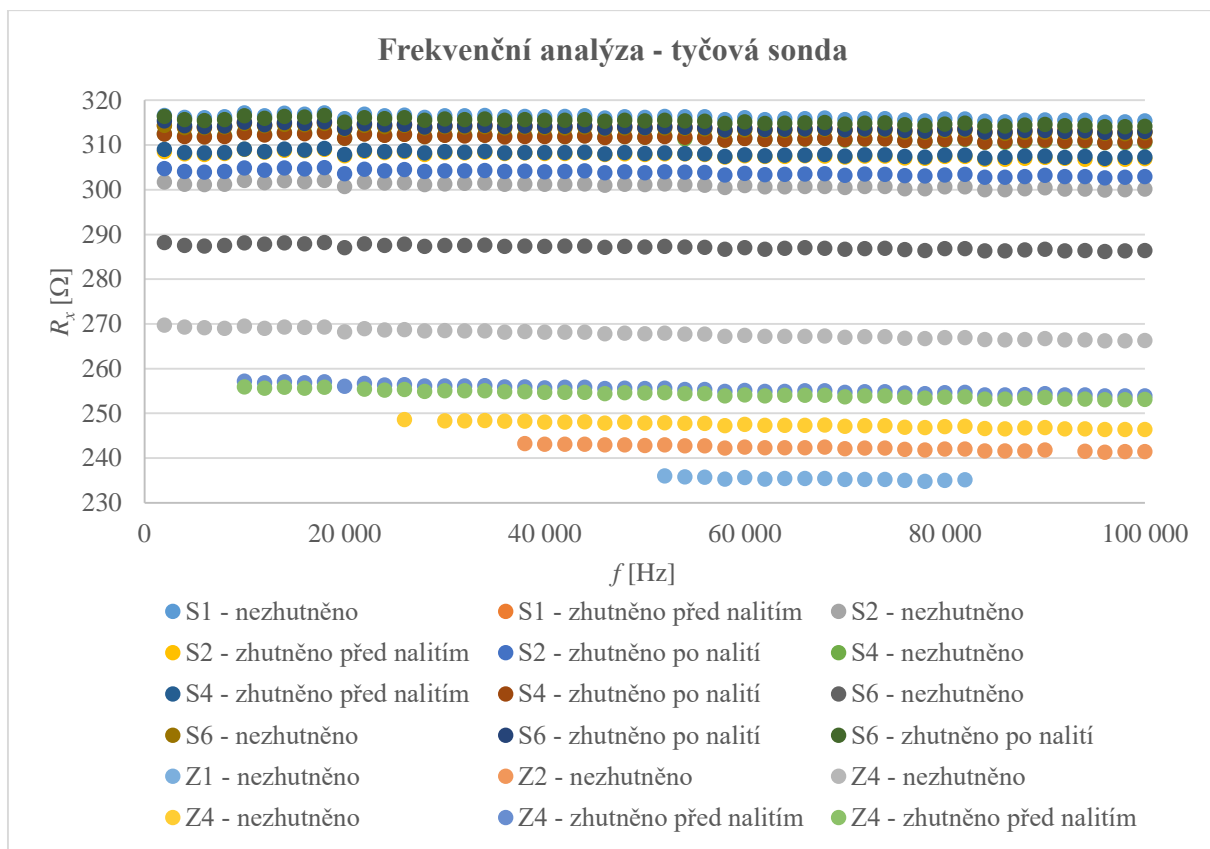


Obr. 7.1 Příklad odstraněných dat – tyčová sonda

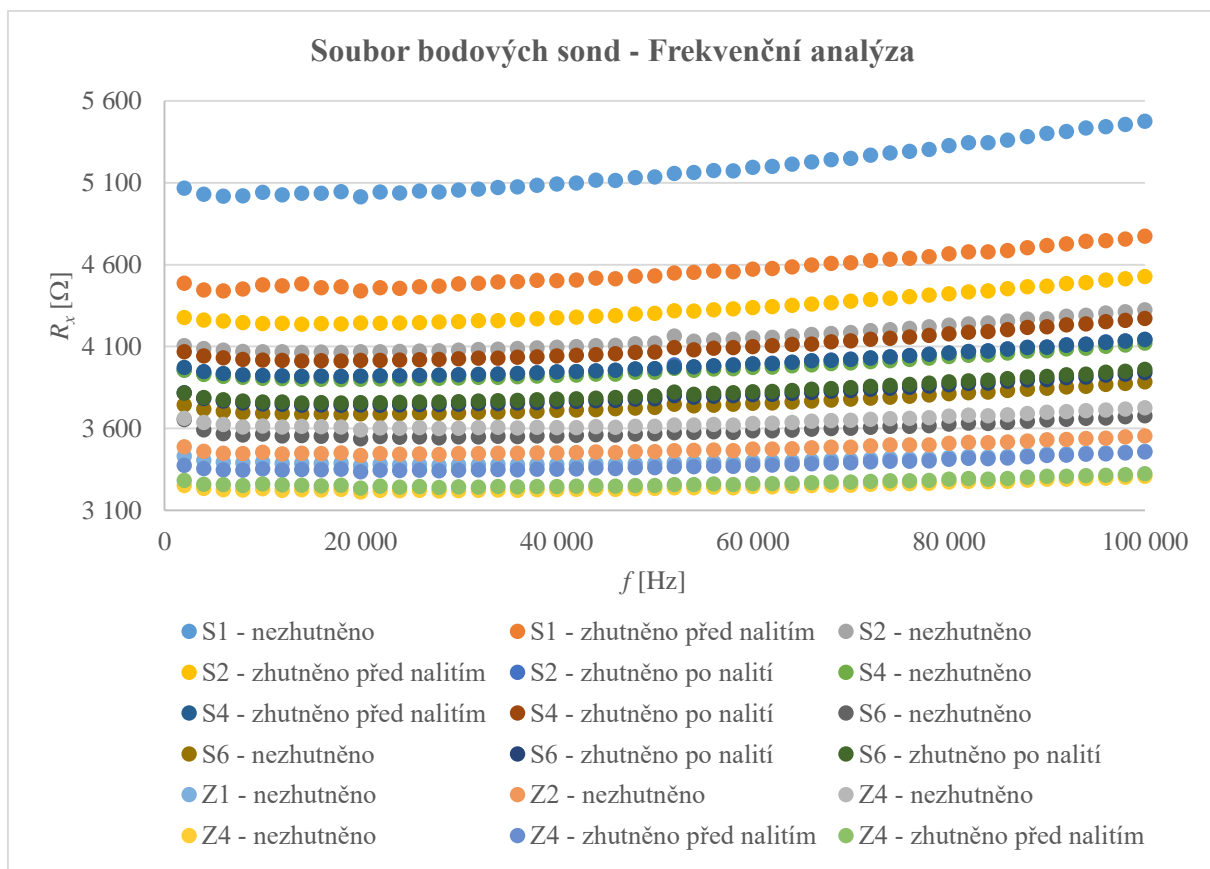


Obr. 7.2 Příklad odstraněných dat – soubor bodových sond (kanál 5)

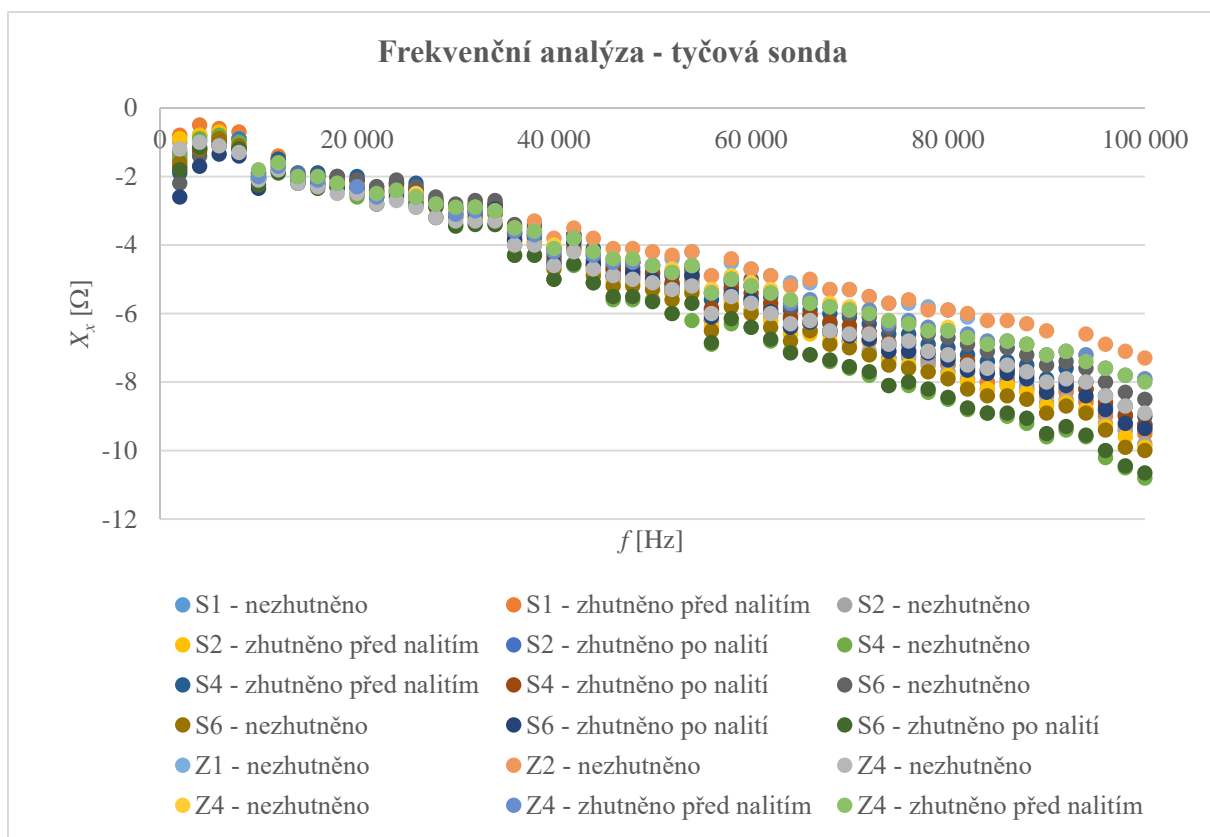
Z výsledků frekvenční analýzy zkoumaných vzorků homogenních materiálů (Obr. 7.3 až Obr. 7.6) je patrné, že při změně frekvence je ovlivněna především imaginární složka X_x elektrické impedance \mathbf{Z} . Naopak reálná složka R_x elektrické impedance \mathbf{Z} je ovlivněna minimálně.



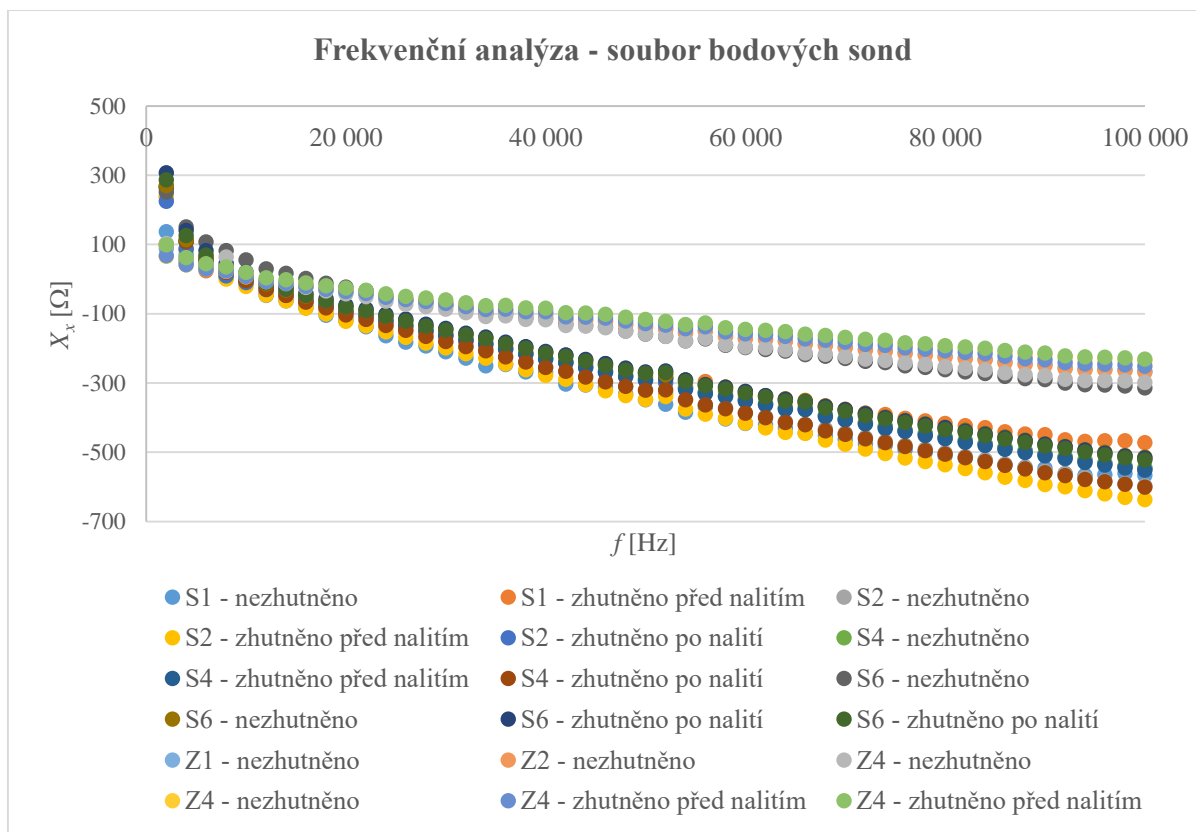
Obr. 7.3 Frekvenční analýza – tyčová sonda



Obr. 7.4 Frekvenční analýza – soubor bodových sond



Obr. 7.5 Frekvenční analýza – tyčová sonda



Obr. 7.6 Frekvenční analýza – soubor bodových sond

Z výsledků vyplývá, že zjištěné absolutní hodnoty reálné složky R_x jsou pro vzorky zemin nižší než pro skleněné kuličky. Uvedený poznatek lze mimo jiné vysvětlit vázanou strukturální vodou v naturálních zrnech bratčického písku a tloušťkou vrstvy obalové vody na jednotlivých zrnech. Rozmezí hodnot, ve kterých se pohybují reálné složky R_x a imaginární složky X_x elektrické impedance Z jsou uvedeny v Tab. 7.2 a Tab. 7.3. Zde je důležité upozornit na řádové rozdíly měřených hodnot obou složek elektrické impedance, jejichž poměr však zůstává zachován, při použití různých měřicích sond. Uvedenou skutečnost lze vysvětlit velikostí plochy imaginárního vodiče tvořeného materiálem mezi elektrodami jednotlivých měřicích sond – soubor bodových sond zachycuje v měrném válci plochu cca 5× menší než tyčová sonda.

Na základě výsledků provedených frekvenčních analýz jednotlivých vzorků materiálu lze pro tato měření doporučit použití tyčové sondy. Důvodem je skutečnost, že vzhledem k délce lépe postihuje rozložení pevných částic a pórů v měřeném vzorku materiálu. Důsledkem uvedené skutečnosti byl i menší rozptyl hodnot obou složek elektrické impedance při opakování měření.

Tab. 7.2 Hodnoty reálné a imaginární složky – tyčová sonda

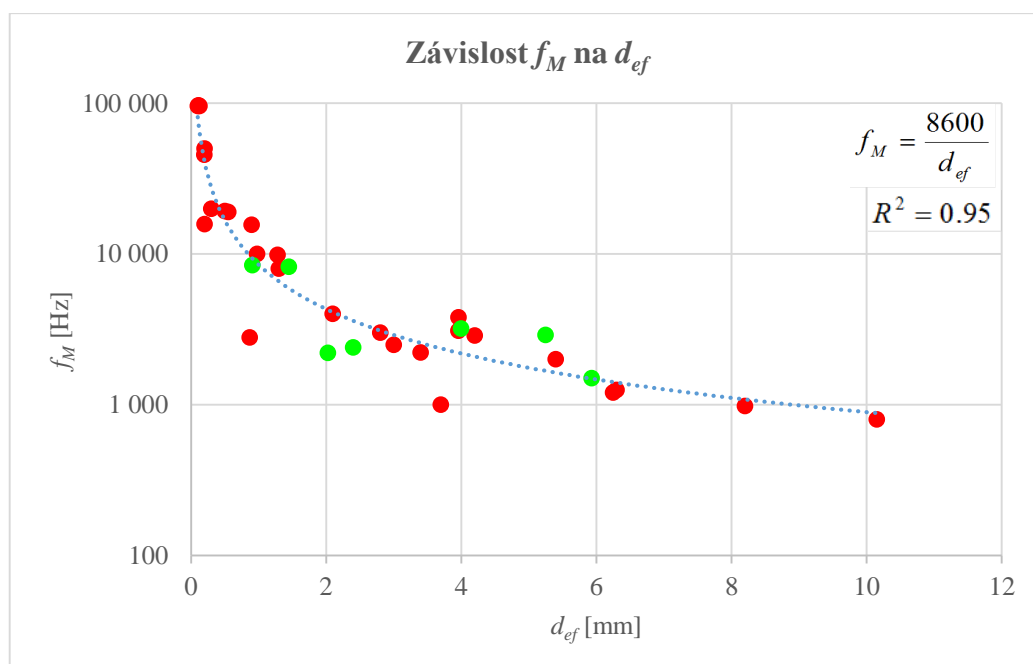
Tyčová sonda		Materiál	
		Skleněné kuličky	Zrna zeminy
Složka	Reálná složka R_x [Ω]	285 – 320	230 – 275
	Imaginární složka X_x [Ω]	-11,0 – 0,0	-9,0 – -1,5

Tab. 7.3 Hodnoty reálné a imaginární složky – soubor bodových sond

Soubor bodových sond		Materiál	
		Skleněné kuličky	Zrna zeminy
Složka	Reálná složka R_x [Ω]	3 500 – 5 500	3 200 – 3 750
	Imaginární složka X_x [Ω]	-650 – 300	-300 – 100

7.2 KORELACE MĚŘICÍ FREKVENCE

Z frekvenční analýzy byla doplněna závislost měřicí frekvence na velikosti efektivního zrna [22], [23], kterou je možné popsat mocninou funkcí f_M (Obr. 7.7). Z dané závislosti, kde zelené body představují výsledky mých měření, je patrné, že pro zvolený materiál a efektivní velikost zrn je možné jako jednotnou měřicí frekvenci pro všechny vzorky volit $f_M = 2\,000$ Hz. Jedna měřicí frekvence pro všechny varianty experimentu byla zvolena z důvodu časové náročnosti experimentálního výzkumu a z potřeby skreslit výsledky měření do jednoho grafu z důvodu jejich porovnání.



Obr. 7.7 Závislost měřicí frekvence na velikosti efektivního zrna

7.3 MĚŘENÍ METODOU EIS

Všechny experimenty byly provedeny v laboratorních podmínkách. Jak již bylo uvedeno, experimenty byly prováděny v různé dny, a proto docházelo k akceptovatelné změně parametrů okolního prostředí a pitné vody odebírané z vodovodního řádu.

Pro měření metodou EIS jsem použila měřicí válec a přístroje Z-metr (Obr. 7.8), které jsem před experimentem konfigurovala prostřednictvím uživatelského menu. Při měření jsem použila invazivní tyčovou sondu a soubor neinvazivních bodových sond, který obsahoval celkem 16 měřicích kanálů, jejichž umístění je uvedeno v Tab. 7.4.

Tab. 7.4 Poloha bodových sond

ch	h	ch	h	ch	h	ch	h
[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]
0	0,050	4	0,130	8	0,210	12	0,290
1	0,070	5	0,150	9	0,230	13	0,310
2	0,090	6	0,170	10	0,250	14	0,330
3	0,110	7	0,190	11	0,270	15	0,350

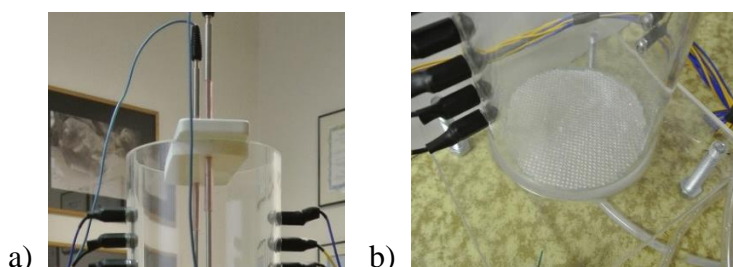
Poloha je brána ode dna měřicího válce.

Před zahájením experimentu jsem měřicí válec umístila na digitální váhu Sartorius (Obr. 7.8), abych mohla během experimentu zaznamenávat váhy důležité pro stanovení zbytkové vlhkosti pomocí gravimetrické metody.



Obr. 7.8 Měřicí válec se sondami

Dále jsem do měřicího válce umístila tyčové sondy, které jsem na malé části izolovala smršťovací hadicí (Obr. 7.9). Z důvodu eliminace parazitních odporů způsobených blízkostí stěny válce jsem tyčovou sondu umístila ve vzdálenosti 0,015 m od stěny válce, osová vzdálenost paralelně umístěných nerezových tyčí sondy byla 0,080 m. Pro zajištění volného odtoku vody z měřicího válce jsem na jeho dno umístila geotextilii (Obr. 7.9), která zamezila vniku zrn materiálu do výpustního otvoru opatřeného hadicí odvádějící vodu ze vzorků materiálů.



Obr. 7.9 Umístění smršťovací hadice na volné konce elektrod tyčové sondy (a), geotextilie (b)

Pokud nedocházelo k hutnění materiálu, byly kabely zajišťující kontakt sond s měřicími přístroji po celou dobu experimentu ponechány ve stejné poloze. Je proto možné předpokládat, že parazitní vliv způsobený délkou a umístěním vodičů byl při měření stejný. Větší parazitní vliv je možné předpokládat u těch variant měření, kde docházelo k hutnění, neboť docházelo k přemísťování měřicího válce na třepačku a pak zpátky na digitální váhu.

Měření zbytkové vlhkosti metodou EIS je rozděleno na dvě části. V první části je popsáno měření pitné vody odebrané z vodovodního řádu. V druhé části je popsáno měření vybraných materiálů zatížených pitnou vodou.

7.3.1 Měření parametrů pitné vody

V první části experimentu byly použity měřicí přístroje Z-metr III a Z-metr IV. Oba měřicí přístroje byly před zahájením experimentu konfigurovány pomocí uživatelského menu (Tab. 7.5). Parametry pitné vody byly stanoveny vždy před zahájením měření každého testovaného vzorku materiálu, jichž bylo celkem 7. Kromě těchto hodnot byly parametry pitné

vody stanoveny ještě v souvislosti se změnou její teploty. Ze souboru 30 měření byly elektrické parametry vody, z nichž obecně nejsledovanějším je konduktivita, stanoveny aritmetickým průměrem.

Tab. 7.5 Nastavení parametrů přístroje Z-metr

Režim měření	párová sonda	-
Počet měřicích kanálů	16	-
Amplituda generovaného signálu	1,0	V
Měřicí frekvence:	2 000	Hz
Doba vzorkování	100	ms
Zpoždění vzorkování	500	ms
Počet opakování	1	-

Stanovení konduktivity je běžnou součástí chemického rozboru vod. Umožňuje odhad koncentrace iontově rozpuštěných látek a celkové mineralizace ve vodách. Konduktivita je lineární funkcí koncentrace iontů, závisí na jejich náboji, pohyblivosti a na teplotě vody. Závislost na teplotě je poměrně výrazná, na základě provedených měření lze konstatovat, že při změně teploty vody o 1 °C se změnila její hodnota konduktivity cca o 2 %. Proto mělo při měření velký význam temperování vzorků testovaných materiálů současně se zatěžovací vodou.

Z hlediska měření vodivosti $G = 1/R$ principiálně totožné s měření elektrického odporu R . Problém připojení sledovaného vzorku (voda, zkoumané materiály) do elektrického měřicího obvodu řeší měřicí sonda (kap. 6.1), jejíž elektrody jsou z inertního materiálu (nerezavějící ocel). Protože měřená hodnota vodivosti vody resp. vzorků materiálů je závislá na vzdálenosti a ploše měřicích elektrod, je třeba provést kalibraci vodivostní měřicí sondy, jejímž výsledkem je tzv. *odporová konstanta* sondy K

$$K = \frac{\sigma}{G}, \quad (7.1)$$

kde konstantou úměrnosti je měrná elektrická vodivost (konduktivita) σ , kterou lze vyjádřit jako inverzní hodnotu měrného elektrického odporu tzv. rezistivity ρ' . V konduktometrii se kalibrace sond provádí měřením s vhodně koncentrovanými roztoky KCl, které slouží jako standard (Tab. 7.6).

Tab. 7.6 Elektrická konduktivita roztoku KCl o koncentraci 0,01 mol·l⁻³ při různých teplotách

Teplota [°C]	20	21	22	25
Konduktivita σ [mS·m ⁻¹]	127,8	130,5	133,2	141,3

Při analýze čistoty vody je proto v praxi používána právě hodnota její konduktivity, která jistým způsobem vypovídá o množství iontově rozpuštěných látek. U destilované či demineralizované vody hodnota konduktivity vypovídá o její kvalitě (vysoce čistá demineralizovaná voda má $\sigma < 5 \cdot 10^{-10} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, ale pozor na rozpuštěný CO₂, který zvyšuje

vodivost). Obvykle se měří při teplotě 25 °C, starší údaje jsou vztahovány na teplotu 20 °C. Pro přibližný přepočet přibližně platí $\sigma_{25} = 1,116 \cdot \sigma_{20}$. Destilovaná voda má konduktivitu 0,05 mS m⁻¹ až 0,3 mS m⁻¹. Povrchové a prosté podpovrchové vody 5 mS m⁻¹ až 50 mS m⁻¹, některé průmyslové vody mohou mít hodnoty vyšší než 103 mS m⁻¹. Průměrná konduktivita pitných vod v ČR je asi 40 mS m⁻¹. Pro kojeneckou a stolní vodu platí mezní hodnota konduktivity 100 mS m⁻¹. Znalost hodnoty konduktivity umožňuje bezprostřední odhad koncentrace iontově rozpuštěných látek a celkové mineralizace ve vodách, rychlý odhad jakosti destilované nebo deionizované vody, koncentrace anorganických látek v přírodních, užitkových a odpadních vodách. V případě přírodních vod, je však souvislost mezi znečištěním a konduktivitou poněkud problematičtější, protože přírodní vody zpravidla obsahují velká množství iontově rozpuštěných látek, které naopak jejich kvalitu z hlediska určitého typu použití zvyšují (např. pitná voda má předepsaný minimální nutný obsah iontů vápníku a hořčíku).

Poněvadž jsem při měření používala pitnou vodu ze stejného vodovodního řádu při odběru v laboratoři, stále stejné elektrody a konfiguraci sond a hodnotu jejich odporové konstanty jsem pro další výpočty nepotřebovala, jejich kalibraci jsem se nezabývala a hodnotu K jsem nestanovovala.

Na začátku experimentu jsem si do odměrného válce nalila 2 l pitné vody teploty $t_v = 20,5$ °C odebrané z vodovodního řádu. Vodu jsem do měřicího válce nalívala postupně po stěně válce vždy nad úroveň měřicího kanálu bodových sond. Pro tyčovou sondu jsem pro každou úroveň změřila hodnoty elektrické impedance pomocí přístrojů Z-metr III a Z-metr IV. U souboru bodových sond jsem hodnoty elektrické impedance změřila po nalití pitné vody nad nejvyšší úroveň měřicího kanálu.

Ze změřených dat byla stanovena konduktivita pitné vody, která byla následně použita pro stanovení zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí. Pro stanovení konduktivity, tj. jedné ze základních vlastností zkoumaného prostředí, je potřeba znát průřezovou plochu vodiče A , která je stanovena z délky elektrod a délky vodiče l , která je dána jejich vzájemnou vzdáleností sond. Pro soubor bodových sond je průřezová plocha vodiče $A = 9,5 \cdot 10^{-5}$ m² a délka vodiče $l = 0,095$ m. Pro tyčovou sondu je průřezová plocha vodiče $A = 0,005$ m² a délka vodiče l je dána délkou sondy pod hladinou vody ve válci (Tab. 7.7). Poloha sond h je brána ode dna měřicího válce.

Tab. 7.7 Délka vodiče – tyčová sonda

h	l	h	l	h	l	h	l
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0,050	0,015	0,130	0,095	0,210	0,175	0,290	0,255
0,070	0,035	0,150	0,115	0,230	0,195	0,310	0,275
0,090	0,055	0,170	0,135	0,250	0,215	0,330	0,295
0,110	0,075	0,190	0,155	0,270	0,235	0,350	0,315

V Tab. 7.8 je uveden příklad zpracování hodnot parametrů pitné vody zjištěných přístrojem Z-metr.

Tab. 7.8 Měření pitné vody – soubor bodových sond

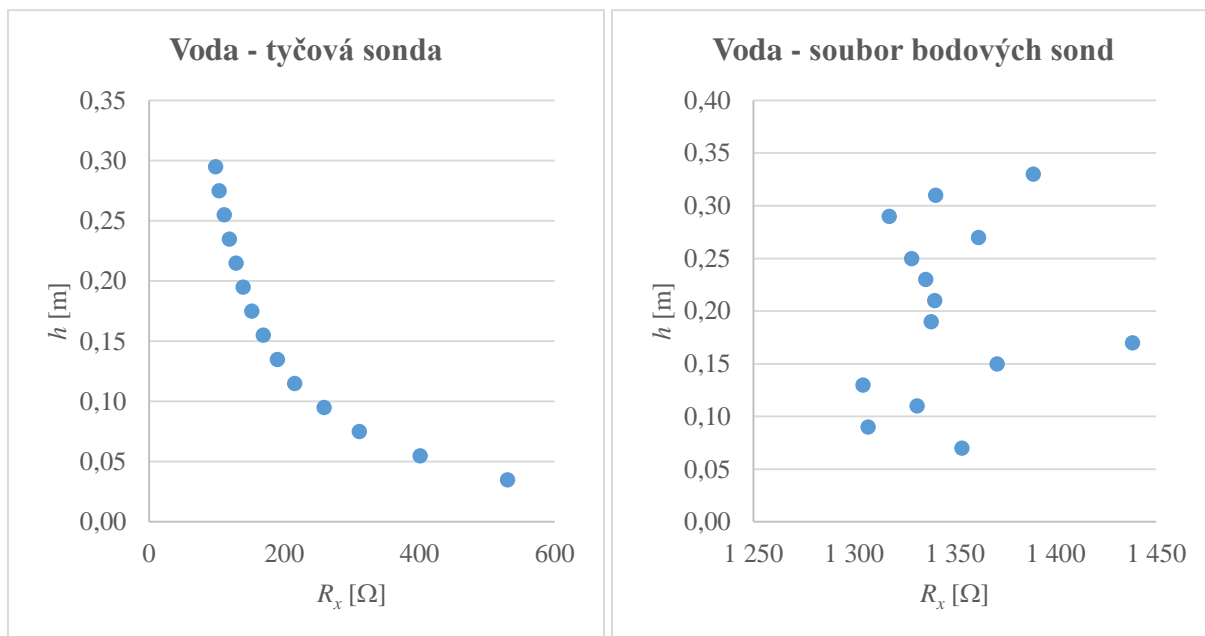
h	ch	R_x	X_x	$ Z $	φ	ρ'	Y	σ
[m]	[-]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[-]	[$\Omega \cdot m$]	[S]	[$S \cdot m^{-1}$]
0,070	1	1 353,5	-72,9	1 355	-0,054	13,54	$7,38 \cdot 10^{-3}$	0,07386
0,090	2	1 306,9	-63,0	1 308	-0,048	13,07	$7,64 \cdot 10^{-3}$	0,07649
0,110	3	1 331,2	-70,8	1 333	-0,053	13,32	$7,50 \cdot 10^{-3}$	0,07509
0,130	4	1 304,4	-59,2	1 306	-0,045	13,05	$7,66 \cdot 10^{-3}$	0,07664
0,150	5	1 370,9	-67,7	1 373	-0,049	13,71	$7,29 \cdot 10^{-3}$	0,07292
0,170	6	1 438,2	-89,1	1 441	-0,062	14,39	$6,94 \cdot 10^{-3}$	0,06951
0,190	7	1 338,2	-72,4	1 340	-0,054	13,39	$7,46 \cdot 10^{-3}$	0,07470
0,210	8	1 340,0	-66,9	1 342	-0,050	13,40	$7,45 \cdot 10^{-3}$	0,07460
0,230	9	1 335,5	-63,9	1 337	-0,048	13,36	$7,48 \cdot 10^{-3}$	0,07485
0,250	10	1 328,5	-61,1	1 330	-0,046	13,29	$7,52 \cdot 10^{-3}$	0,07525
0,270	11	1 361,8	-69,5	1 364	-0,051	13,62	$7,33 \cdot 10^{-3}$	0,07341
0,290	12	1 317,4	-67,5	1 319	-0,051	13,18	$7,58 \cdot 10^{-3}$	0,07588
0,310	13	1 340,4	-72,9	1 342	-0,054	13,41	$7,45 \cdot 10^{-3}$	0,07458
0,330	14	1 389,0	-69,3	1 391	-0,050	13,89	$7,19 \cdot 10^{-3}$	0,07197
Průměrná hodnota						13,47		0,07422

Ze stanovených hodnot rezistivity pro jednotlivé měřicí úrovně byla stanovena průměrná hodnota. Souborem bodových sond byla aritmetickým průměrem stanovena hodnota rezistivity $\rho' = 13,47 \Omega \cdot m$, tyčovou sondou byla rovněž zjištěna průměrná rezistivita $\rho' = 13,47 \Omega \cdot m$. Konduktivita pitné vody o teplotě 20 °C, kterou jsem použila pro můj experiment v jeho variantách s různými materiály, byla $\sigma = 0,07422 S \cdot m^{-1}$ resp. 74,22 mS·m⁻¹. Při přepočtu na standardizovanou hodnotu teploty 25 °C je průměrná hodnota konduktivity 82,83 mS·m⁻¹. Neměla jsem k dispozici jiné měřidlo, kterým bych zjištěnou hodnotu konduktivity pitné vody mohla ověřit. Na základě provedené literární rešerše [26], však lze hodnotu považovat za adekvátní.

Na níže uvedených obrázcích (Obr. 7.10 až Obr. 7.13) jsou uvedeny průběhy elektrických veličin v závislosti na výšce vodního sloupce v měrném válci pro oba typy sond. Je třeba zdůraznit, že zatímco tyčová sonda vždy vykazuje určitý trend vývoje hodnot elektrických parametrů s proměnnou výškou vodního sloupce (mění se průřez elektrického vodiče

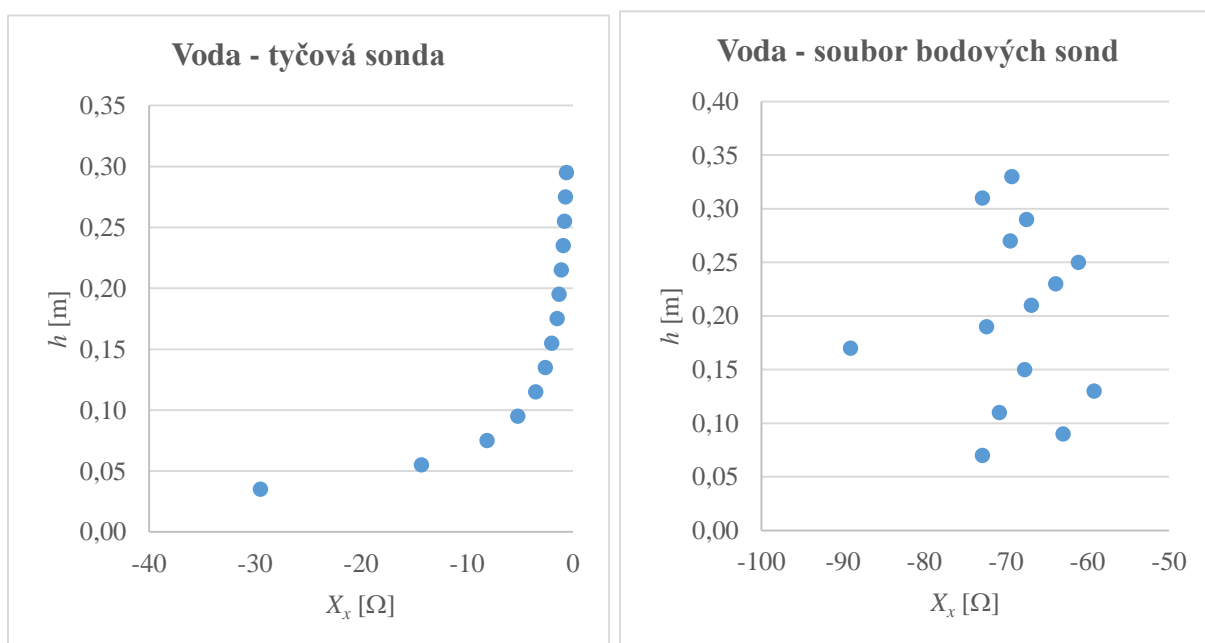
reprezentovaný úrovní hladiny vody), měření souborem bodových sond demonstruje rozptyl hodnot elektrických parametrů vlivem rozpuštěného kyslíku ve vodě, případně teplotní stratifikace vody ve válci, uložení kabelů a dalších parazitních jevů, neboť měřený průřez daný plochou elektrod sondy se nemění.

Na Obr. 7.10 jsou znázorněné průběhy reálné složky elektrické impedance R_x v závislosti na změně hloubky h pro soubor bodových sond a pro tyčovou sondu.



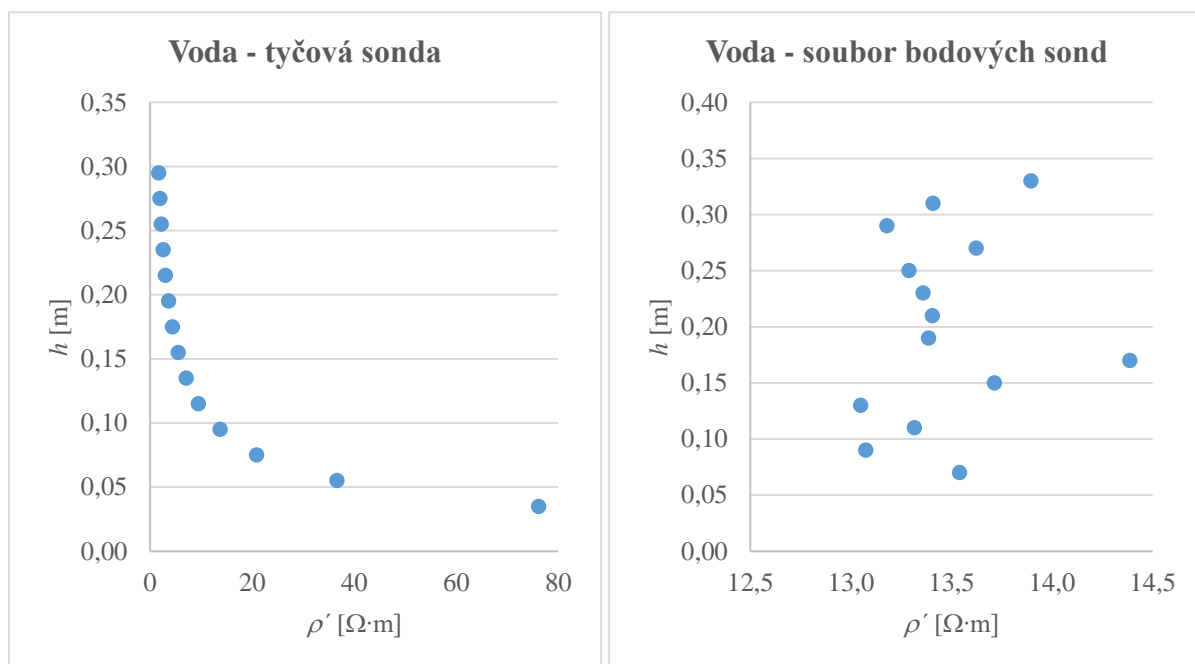
Obr. 7.10 Závislost reálné složky R_x elektrické impedance na změně hloubky h

Na Obr. 7.11 jsou znázorněné průběhy imaginární složky elektrické impedance X_x v závislosti na změně hloubky h pro soubor bodových sond a pro tyčovou sondu.



Obr. 7.11 Závislost imaginární složky X_x elektrické impedance na změně hloubky h

Na Obr. 7.12 jsou znázorněny průběhy rezistivity ρ' v závislosti na změně hloubky h pitné vody v měrném válci pro soubor bodových sond a pro tyčovou sondu.



Obr. 7.12 Závislost rezistivity ρ' na změně hloubky h

Ačkoli by se na základě uvedených grafických průběhů mohlo zdát, že rozptyl hodnot elektrických veličin měřených souborem bodových sond je značný, pohybuje se do 10 %.

7.3.2 Měření vybraného materiálu

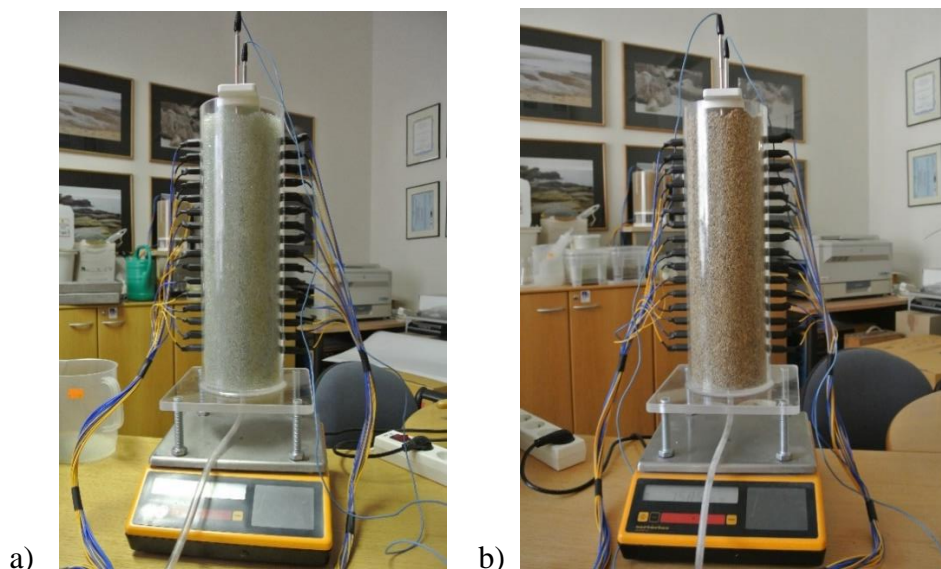
V druhé části experimentu byly při měření použity přístroje Z-metr III, Z-metr IV v.0 a Z-metr IV. Všechny tři měřicí přístroje byly před zahájením experimentu konfigurovány prostřednictvím jejich uživatelského menu (Tab. 7.9).

Tab. 7.9 Nastavení parametrů přístroje Z-metr

Režim měření		párová sonda	-
Počet měřicích kanálů	Tyčová sonda	1	-
	Soubor bodových sond	16	-
Amplituda generovaného signálu		1,0	V
Měřicí frekvence:		2 000	Hz
Doba vzorkování		100	ms
Zpoždění vzorkování		500	ms
Počet opakování		1	-

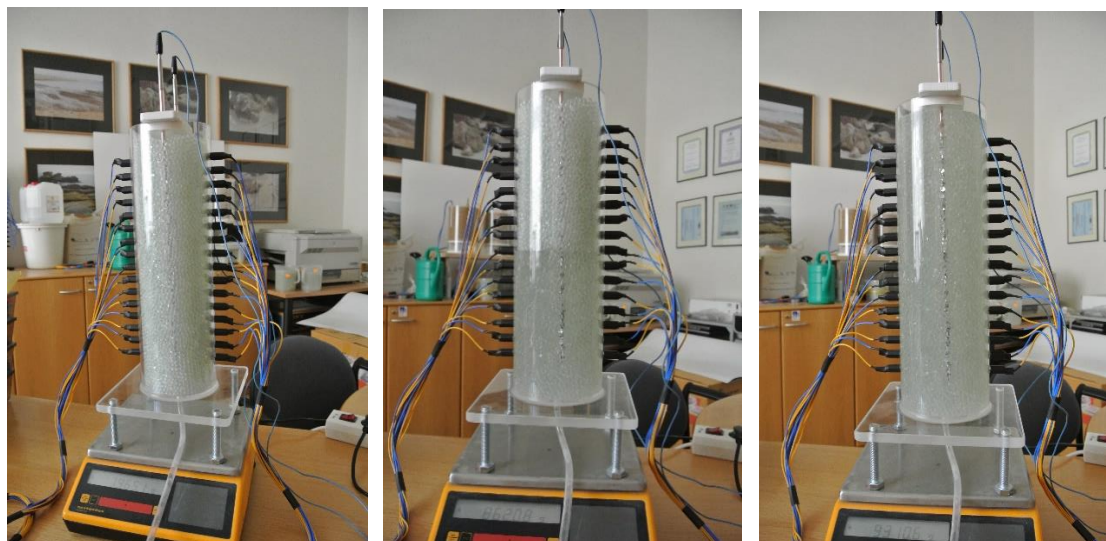
Na začátku každého experimentu jsem si připravila do odměrné nádoby pitnou vodu teploty 20 °C a konduktivity 74,22 mS·m⁻¹, kterou jsem odebrala z vodovodního řadu. Poté jsem do měřicího válce, který byl umístěn na digitální váze, nasypala zvolený materiál (Obr. 7.13).

Materiál byl do válce nasypán pomocí trychtýře nad úroveň nejvyššího měřicího kanálu souboru bodových sond. Soustavu měřicí válec, materiál a odměrnou nádobu s pitnou vodou jsem nechala cca 30 min. temperovat v místnosti, kde jsem následně prováděla měření.



Obr. 7.13 Příklad měřicího válce po nasypání materiálu (a – skleněné kuličky, b – zrna zeminy)

Po nasypání vzorku materiálu do měřicího válce byl tento vzorek postupně zatěžován pitnou vodou (Obr. 7.14) z odměrné nádoby. Voda byla nalévána po stěně válce vždy nad úroveň měřicího kanálu souboru bodových sond, a to postupně od nejnižšího měřicího kanálu, až po nejvyšší měřicí kanál. Měření tyčovou sondou jsem provedla vždy, když úroveň hladiny vody ve vzorku dosáhla některé z úrovní bodové sondy. Pro soubor bodových sond byly hodnoty elektrické impedance změřeny souhrnně až po zatížení celého vzorku nad nejvyšší měřicí kanál.



Obr. 7.14 Příklad průběhu experimentu

Příklad zpracování dat po zatížení vzorku materiálu vodou je uveden v Tab. 7.10 pro tyčovou sondu a v Tab. 7.11 pro soubor bodových sond. Je třeba zdůraznit, že v případě tyčové sondy se měřená plocha zvyšuje. Pokud bych chtěla měření tyčovou sondou korelovat se souborem bodových sond, bylo by třeba v každém následujícím měření zohlednit hodnotu

předcházejícího měření s menším průřezem elektrického vodiče tvořeného materiálem zatíženým vodou. Povaha mé diplomové práce však uvedenou korelaci nevyžadovala, a vzhledem k obsáhlým datovým souborům a počtu variant experimentu a jejich opakování, celkem jsem zpracovala 20 400 dat, jsem se uvedenou úlohou dále nezabývala.

Tab. 7.10 Příklad zpracování dat po zatížení vzorku materiálu vodou – tyčová sonda

h	l	R_x	X_x	$ Z $	φ	ρ'	Y	σ
[m]	[m]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[-]	[$\Omega \cdot m$]	[S]	[$S \cdot m^{-1}$]
0,070	0,035	1 740,0	-7,5	1 740	$-4,31 \cdot 10^{-3}$	249,89	$5,75 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$
0,090	0,055	1 371,6	-5,1	1 372	$-3,72 \cdot 10^{-3}$	125,35	$7,29 \cdot 10^{-4}$	$7,98 \cdot 10^{-3}$
0,110	0,075	999,4	-4,2	999	$-4,20 \cdot 10^{-3}$	66,98	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$1,49 \cdot 10^{-2}$
0,130	0,095	850,8	-2,4	851	$-2,82 \cdot 10^{-3}$	45,02	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-2}$
0,150	0,115	726,8	-1,0	727	$-1,38 \cdot 10^{-3}$	31,77	$1,38 \cdot 10^{-3}$	$3,15 \cdot 10^{-2}$
0,170	0,135	604,6	-1,1	605	$-1,82 \cdot 10^{-3}$	22,51	$1,65 \cdot 10^{-3}$	$4,44 \cdot 10^{-2}$
0,190	0,155	569,9	-1,6	570	$-2,81 \cdot 10^{-3}$	18,48	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$5,41 \cdot 10^{-2}$
0,210	0,175	507,9	-0,8	508	$-1,58 \cdot 10^{-3}$	14,59	$1,97 \cdot 10^{-3}$	$6,85 \cdot 10^{-2}$
0,230	0,195	456,4	-2,0	456	$-4,38 \cdot 10^{-3}$	11,76	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$8,50 \cdot 10^{-2}$
0,250	0,215	423,1	-1,0	423	$-2,36 \cdot 10^{-3}$	9,89	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-1}$
0,270	0,235	391,5	-1,4	392	$-3,58 \cdot 10^{-3}$	8,37	$2,55 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-1}$
0,290	0,255	363,0	-0,7	363	$-1,93 \cdot 10^{-3}$	7,16	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \cdot 10^{-1}$
0,310	0,275	339,9	-1,1	340	$-3,24 \cdot 10^{-3}$	6,21	$2,94 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-1}$
0,330	0,295	322,2	-1,3	322	$-4,03 \cdot 10^{-3}$	5,49	$3,10 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-1}$

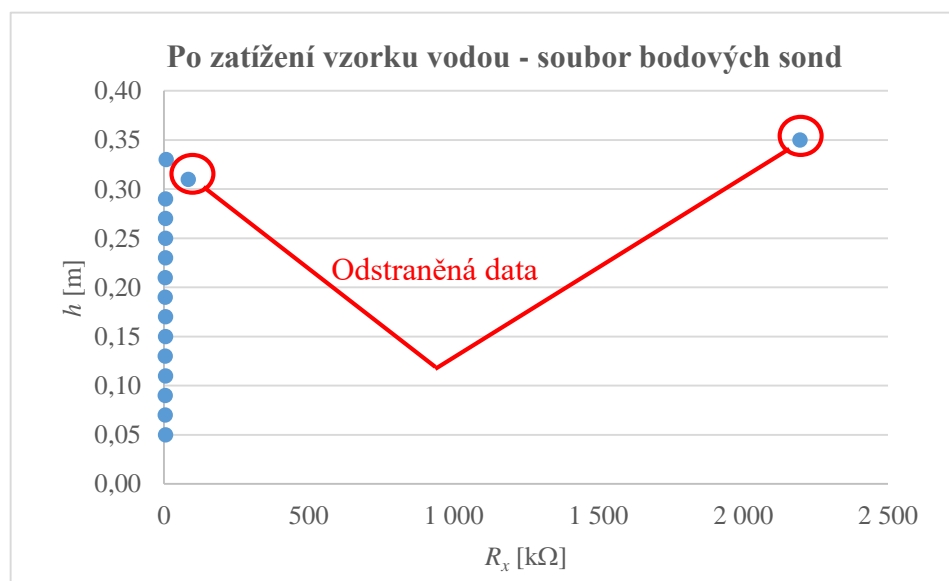
Tab. 7.11 Příklad zpracování dat po zatížení vzorku materiálu vodou – soubor bodových sond

h	ch	R_x	X_x	$ Z $	φ	ρ'	Y	σ
[m]	[-]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[-]	[$\Omega \cdot m$]	[S]	[$S \cdot m^{-1}$]
0,070	1	4 639,3	-149,7	4 642	$-3,23 \cdot 10^{-2}$	46,41	$2,15 \cdot 10^{-4}$	0,0215
0,090	2	4 719,6	-160,3	4 722	$-3,40 \cdot 10^{-2}$	47,21	$2,12 \cdot 10^{-4}$	0,0212
0,110	3	4 699,5	-178,2	4 703	$-3,79 \cdot 10^{-2}$	47,01	$2,13 \cdot 10^{-4}$	0,0213
0,130	4	4 552,4	-124,1	4 554	$-2,73 \cdot 10^{-2}$	45,54	$2,20 \cdot 10^{-4}$	0,0220
0,150	5	4 699,9	-149,6	4 702	$-3,18 \cdot 10^{-2}$	47,02	$2,13 \cdot 10^{-4}$	0,0213
0,170	6	4 621,0	-194,9	4 625	$-4,22 \cdot 10^{-2}$	46,23	$2,16 \cdot 10^{-4}$	0,0216
0,190	7	4 868,8	-148,3	4 871	$-3,04 \cdot 10^{-2}$	48,71	$2,05 \cdot 10^{-4}$	0,0205

h	ch	R_x	X_x	$ Z $	φ	ρ'	Y	σ
[m]	[-]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[-]	[$\Omega \cdot m$]	[S]	[$S \cdot m^{-1}$]
0,210	8	4 594,0	-147,4	4 596	$-3,21 \cdot 10^{-2}$	45,96	$2,18 \cdot 10^{-4}$	0,0218
0,230	9	4 610,7	-136,8	4 613	$-2,97 \cdot 10^{-2}$	46,12	$2,17 \cdot 10^{-4}$	0,0217
0,250	10	4 617,4	-116,6	4 619	$-2,52 \cdot 10^{-2}$	46,19	$2,17 \cdot 10^{-4}$	0,0216
0,270	11	4 648,6	-141,4	4 651	$-3,04 \cdot 10^{-2}$	46,50	$2,15 \cdot 10^{-4}$	0,0215
0,290	12	4 518,3	-118,8	4 520	$-2,63 \cdot 10^{-2}$	45,20	$2,21 \cdot 10^{-4}$	0,0221
0,310	13	4 654,5	-137,7	4 657	$-2,96 \cdot 10^{-2}$	46,56	$2,15 \cdot 10^{-4}$	0,0215
0,330	14	4 856,8	-61,0	4 857	$-1,26 \cdot 10^{-2}$	48,58	$2,06 \cdot 10^{-4}$	0,0206
Průměrná hodnota						46,66		0,0214

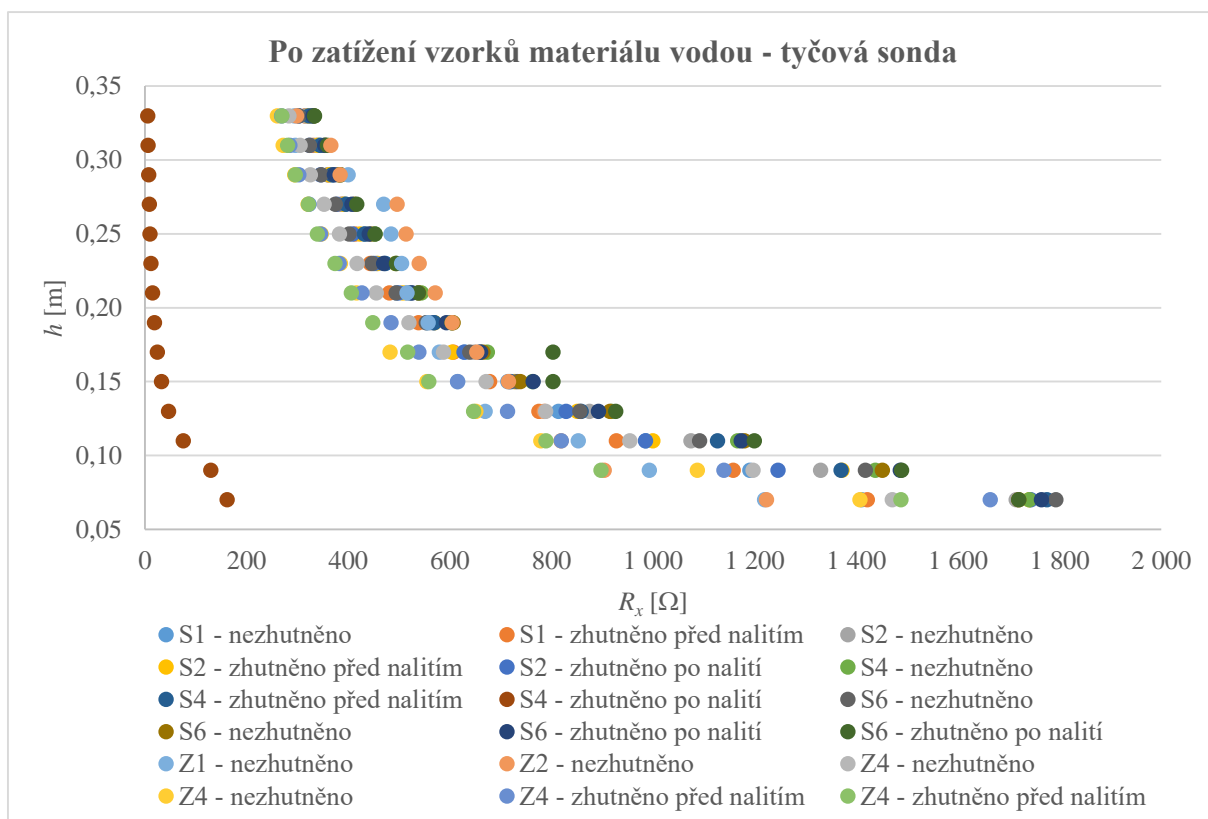
Ze získaných dat byly pro obě varianty konstrukčního řešení měřicích sond v odpovídajících úrovních vyjádřeny hodnoty rezistivity. Vzhledem k tomu, že každá varianta měření byla 5 opakovaná, byly výsledné hodnoty rezistivity stanoveny jako aritmetické průměry hodnot v jednotlivých měřicích úrovních. Uvedeným postupem zjištěné hodnoty rezistivity resp. konduktivity byly využity při stanovení aktivní pórovitosti – zbytkové vlhkosti.

Obdobně jako v případě provedené frekvenční analýzy bylo nutno některá data z dalšího zpracování vyloučit (Obr. 7.15). Při vyhodnocení souboru bodových sond byl z měření vyloučen nejnižší a nejvyšší měřicí kanál, protože pravděpodobně vlivem kontaktu s atmosférickým vzduchem (nejvyšší měřicí kanál) či blízkosti výpustního otvoru (nejnižší kanál) zde nejčastěji docházelo k chybovým měřením. Počáteční a konečná hraniční podmínka zpracovávaného souboru dat byla pro všechny měřené soubory stanovena do úrovně druhého a třináctého měřicího kanálu souboru bodových sond. Z dalšího zpracování byla dále vyloučena data, jejichž odchylka od průměrné hodnoty byla větší než $\pm 5\%$.

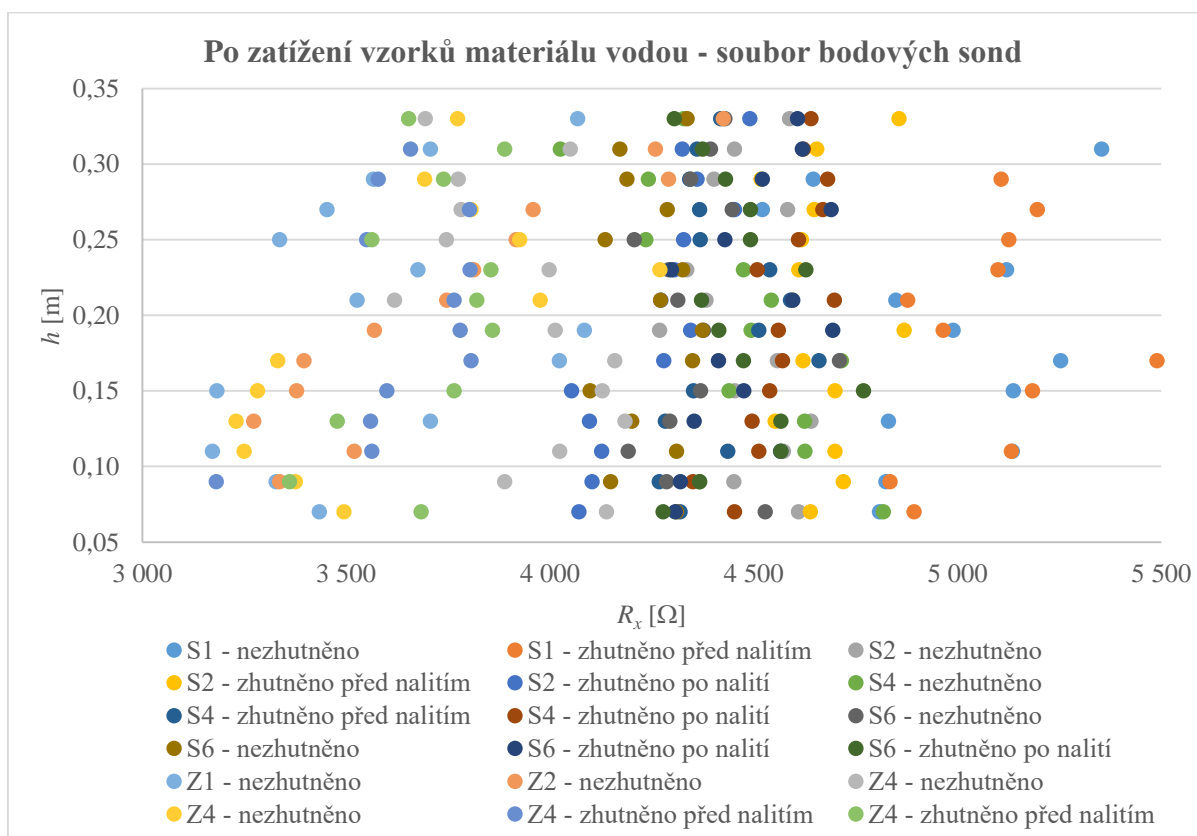


Obr. 7.15 Příklad odstranění chybových dat zjištěných souborem bodových sond

Na Obr. 7.16 a Obr. 7.17 jsou znázorněny závislosti reálné složky elektrické impedance R_x na změně hloubky h pro soubor bodových sond a pro tyčovou sondu.

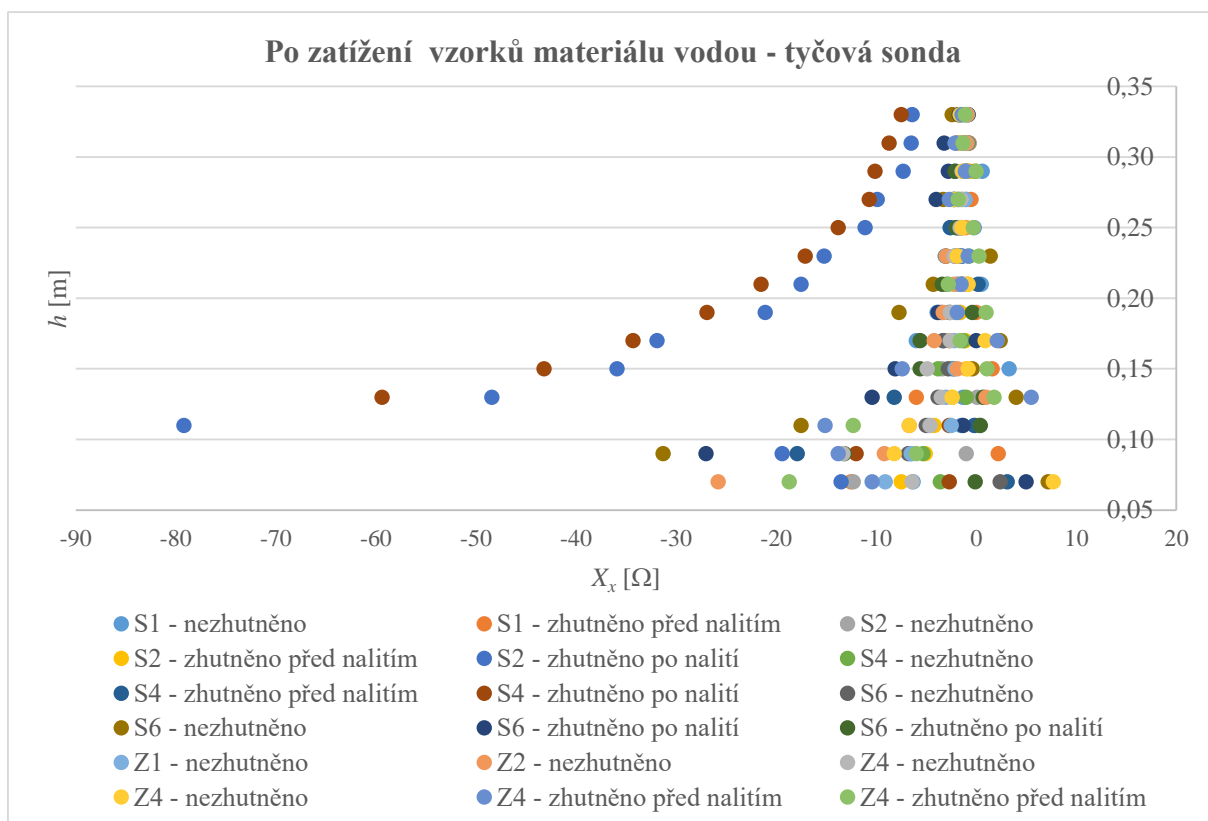


Obr. 7.16 Závislost R_x na hloubce h po zatížení vzorků vodou – tyčová sonda

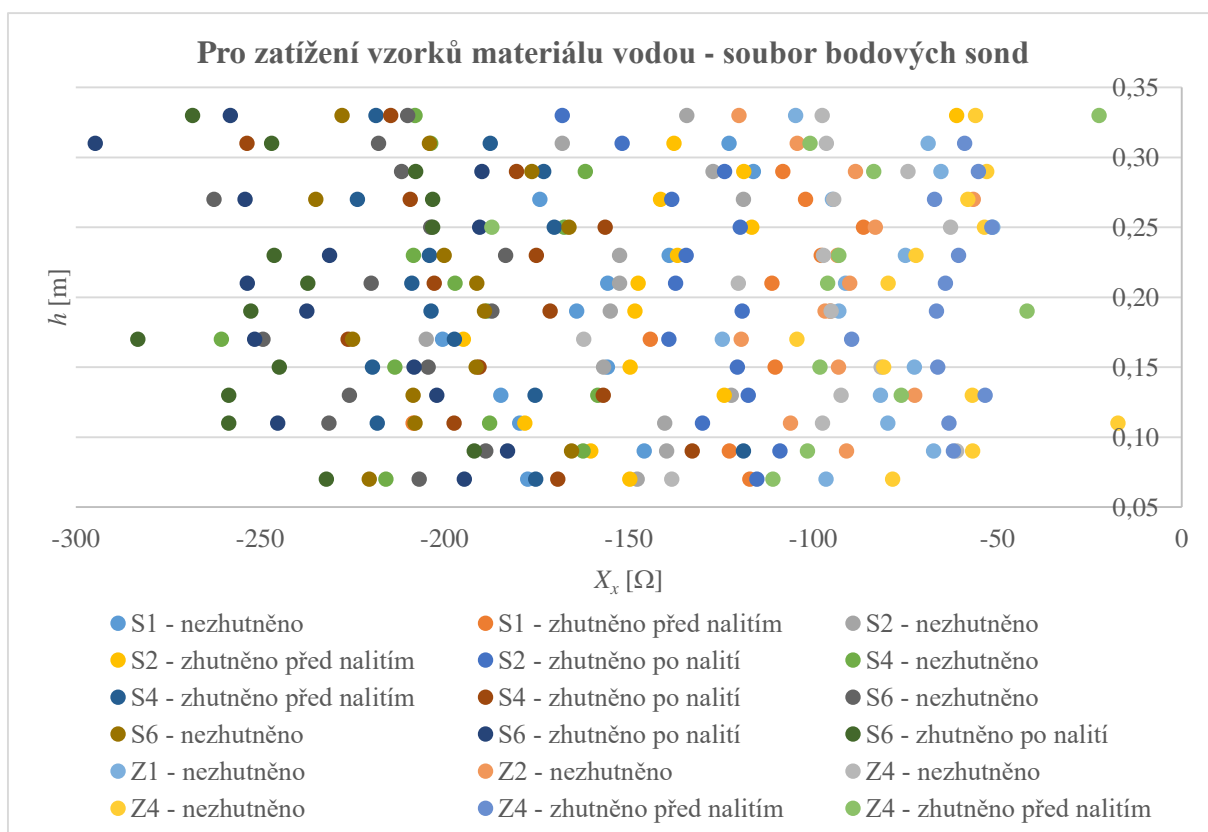


Obr. 7.17 Závislost R_x na hloubce h po zatížení vzorků vodou – soubor bodových sond

Na Obr. 7.18 a Obr. 7.19 jsou znázorněny závislosti imaginární složky elektrické impedance X_x na změně hloubky h pro soubor bodových sond a pro tyčovou sondu.

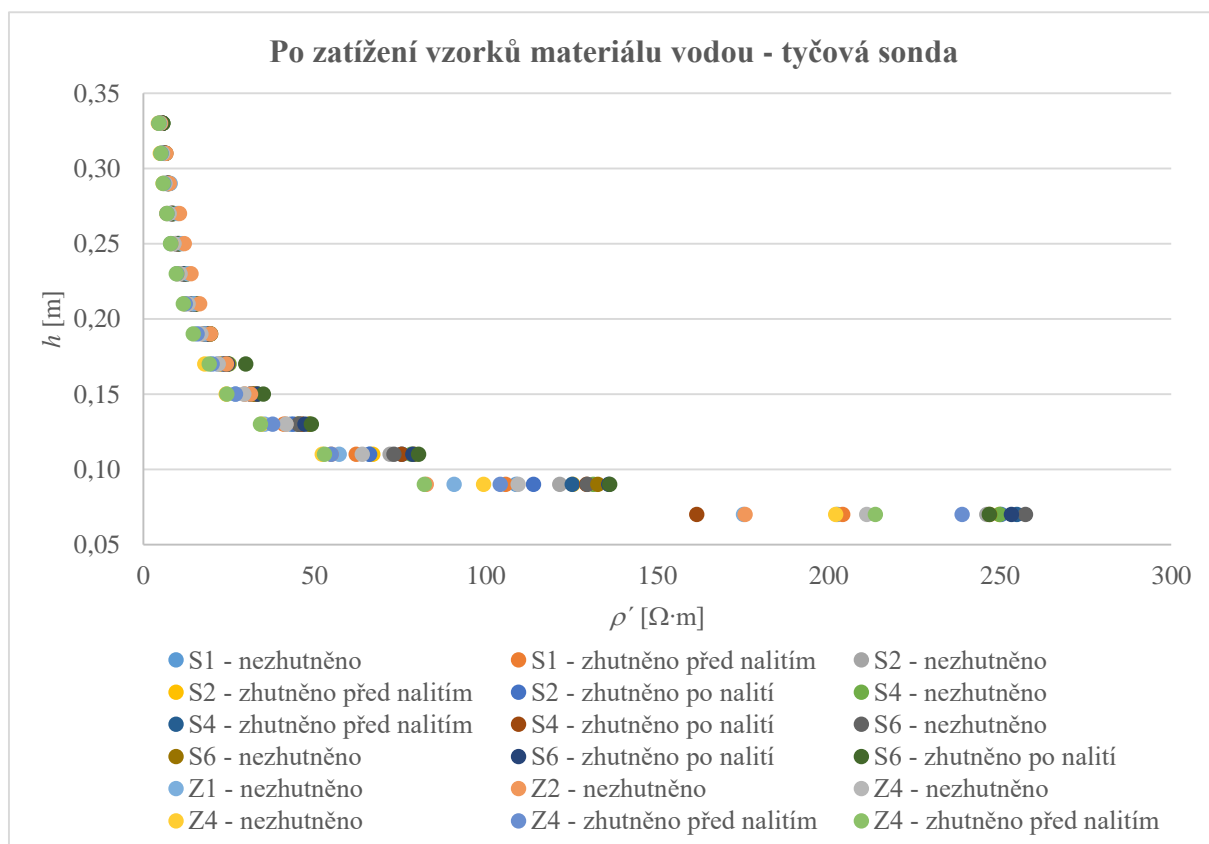


Obr. 7.18 Vyhodnocená závislost X_x na hloubce h po zatížení vzorků vodou – tyčová sonda

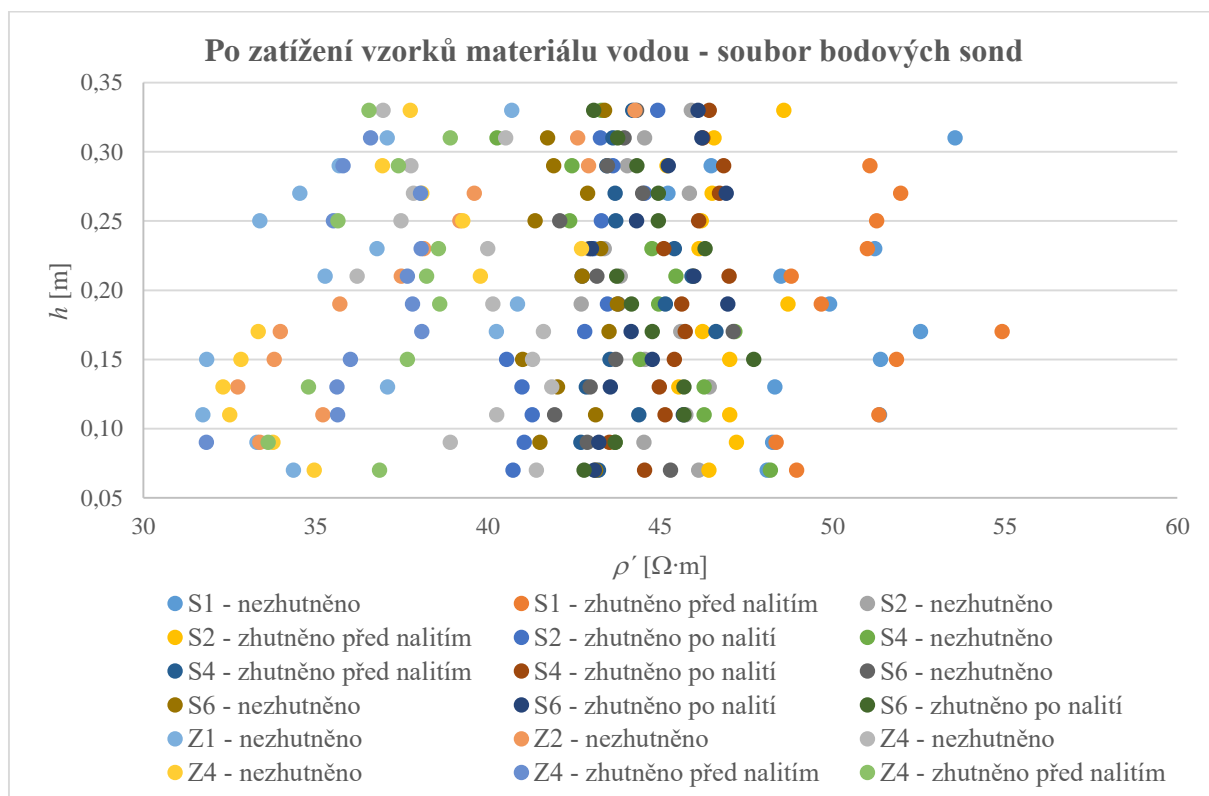


Obr. 7.19 Vyhodnocená závislost X_x na hloubce h po zatížení vzorků vodou – soubor bodových sond

Na Obr. 7.20 a Obr. 7.21 jsou znázorněné závislosti rezistivity ρ' na změně hloubky h pro soubor bodových sond a pro tyčovou sondu.

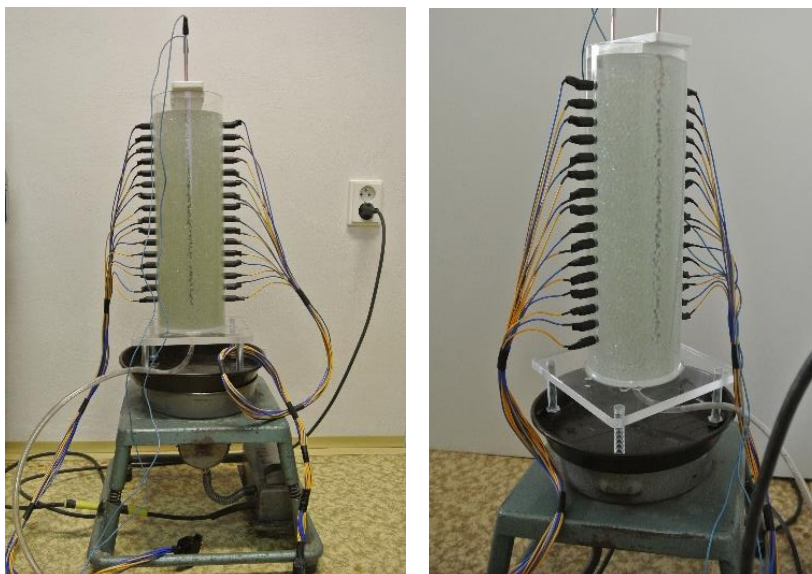


Obr. 7.20 Závislost ρ' na hloubce h po zatížení vzorku vodou – tyčová sonda



Obr. 7.21 Závislost ρ' na hloubce h po zatížení vzorku vodou – soubor bodových sond

Další variantou experimentu bylo zhutnění (Obr. 7.22) testovaných vzorků materiálu, které bylo opět variantně provedeno před a po zatížení vzorku vodou. Při hutnění byly měřicí sondy odpojeny od přístrojů a se všemi sondami byl měřicí válec přemístěn na třepačku. Poté bylo provedeno zhutnění vzorku třepáním, které trvalo přibližně 20 sekund, a propichováním. Po zhutnění byl měřicí válec přemístěn zpět na digitální váhu a měřicí sondy byly připojeny k Z-metrům.



Obr. 7.22 Umístění měřicího válce na třepačce

Metodou EIS je zbytková vlhkost stanovena jako podíl hodnoty rezistivity pitné vody, která byla pro oba typy sond $\rho' = 13,47 \Omega\cdot\text{m}$ k hodnotě rezistivity daného vzorku materiálu

$$n_{aEIS} = \frac{\rho'_{vody}}{\rho_{soubor\ bodov\ ych\ sond}} = \frac{\rho'_{vody}}{\rho_{ty\ yov\ a\ sonda}} [-]. \quad (7.2)$$

Dosažené výsledky jsou uvedeny v Tab. 7.12. Uvedené hodnoty aktivní pórovitosti testovaných materiálů odpovídají variantě experimentu, kdy materiál v měřicím válci nebyl zhutněn.

Tab. 7.12 Zbytková vlhkost materiálu stanovená metodou EIS

Materiál	Tyčová sonda $n_{aEIS} [-]$	Soubor bodových sond $n_{aEIS} [-]$	Odchylka [%]
Skleněné kuličky 0,001m	0,338	0,271	16,77
Skleněné kuličky 0,002m	0,302	0,301	0,33
Skleněné kuličky 0,004m	0,272	0,305	-12,13
Skleněné kuličky 0,006m	0,295	0,309	-4,75
Zrna zeminy 0,001 m	0,383	0,374	2,35
Zrna zeminy 0,002 m	0,376	0,358	4,79
Zrna zeminy 0,004 m	0,363	0,371	-2,20

Měřicí soustava experimentu stanovení zbytkové vlhkosti byla koncipována jako stacionární, což znamená, že byly měřeny její statické charakteristiky, které vyjadřují vztahy mezi měřenými veličinami v ustáleném stavu. Experiment lze pojmut i jako sledování dynamických vlastností vybraných parametrů ovlivňujících hodnotu zbytkové vlhkosti v čase, což by bylo možné například při procesu vypouštění vody z měřicího válce. Měření procesu vypouštění vody z měřicího válce sondami EIS (Obr. 7.20 až Obr. 7.22) uvádím jako doložení předpokladu možného využití obou konstrukcí sond EIS i v dynamickém procesu. Měření sondami EIS různých konstrukcí je v uvedeném případě stanovení zbytkové vlhkosti materiálů pilotní, a proto jsem pro vyhodnocení upřednostnila sledování statických charakteristik měřeného pórovitého prostředí.

Před zahájením měření procesu vypouštění vody z měrného válce naplněného testovaným materiálem bylo nutno prostřednictvím uživatelského menu konfigurovat použité Z-metry (Tab. 7.13). U každého měřicího přístroje Z-metr byl nastaven maximální počet opakování měření, aby bylo možno postihnout celý proces vypouštění vody z měrného válce. S ukončením sběru dat Z-metry bylo ukončeno měření studovaného procesu. Při použití měřicího přístroje Z-metr IV, bylo nutné během procesu vypouštění opakovaně spouštět měření, protože tento měřicí přístroj dovoluje zadat pouze malé množství opakování měření, které bylo pro dobu sledování procesu vypouštění nedostačující, což jsem následně oznámila jako konstrukční vadu přístroje.

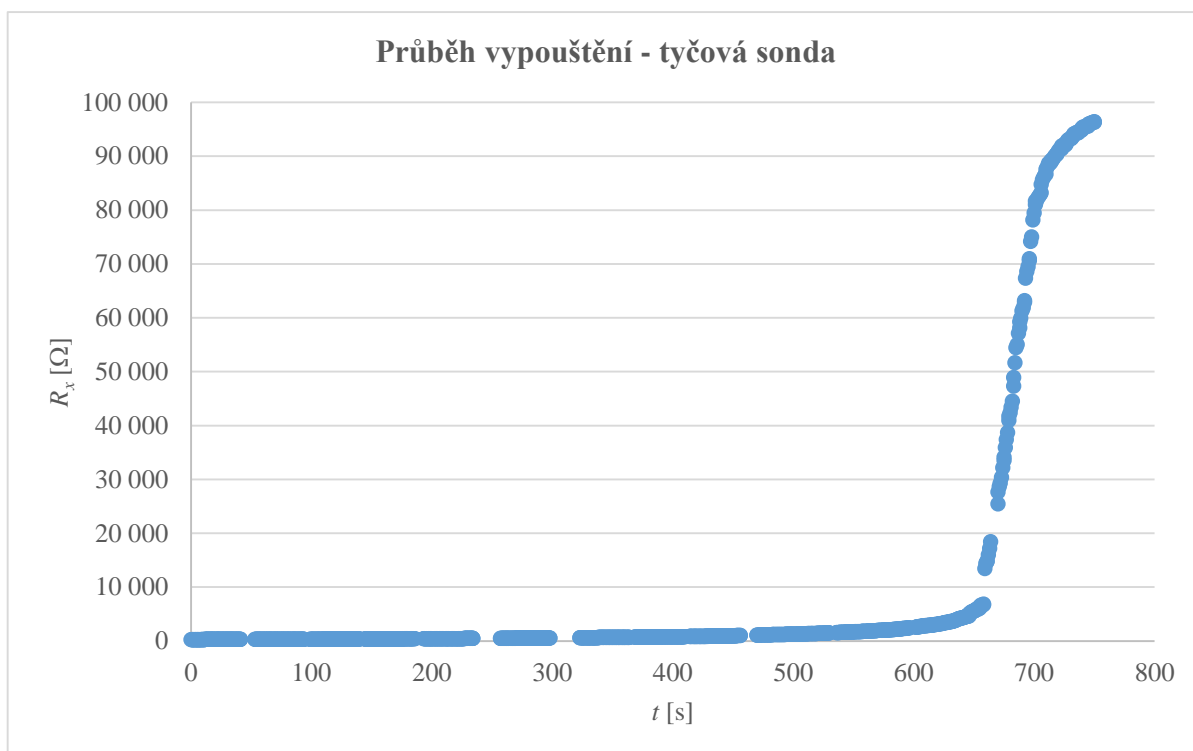
Tab. 7.13 Nastavení parametrů přístroje Z-metr

Režim měření		párová sonda	-
Počet měřicích kanálů	Tyčová sonda	1	-
	Soubor bodových sond	16	-
Měřicí frekvence		2 000	Hz
Amplituda generovaného signálu		1,0	V
Doba vzorkování		100	ms
Zpoždění vzorkování		500	ms
Počet opakování	Z-metr III	100	-
	Z-metr IV v.0	999	-
	Z-metr IV	32	-

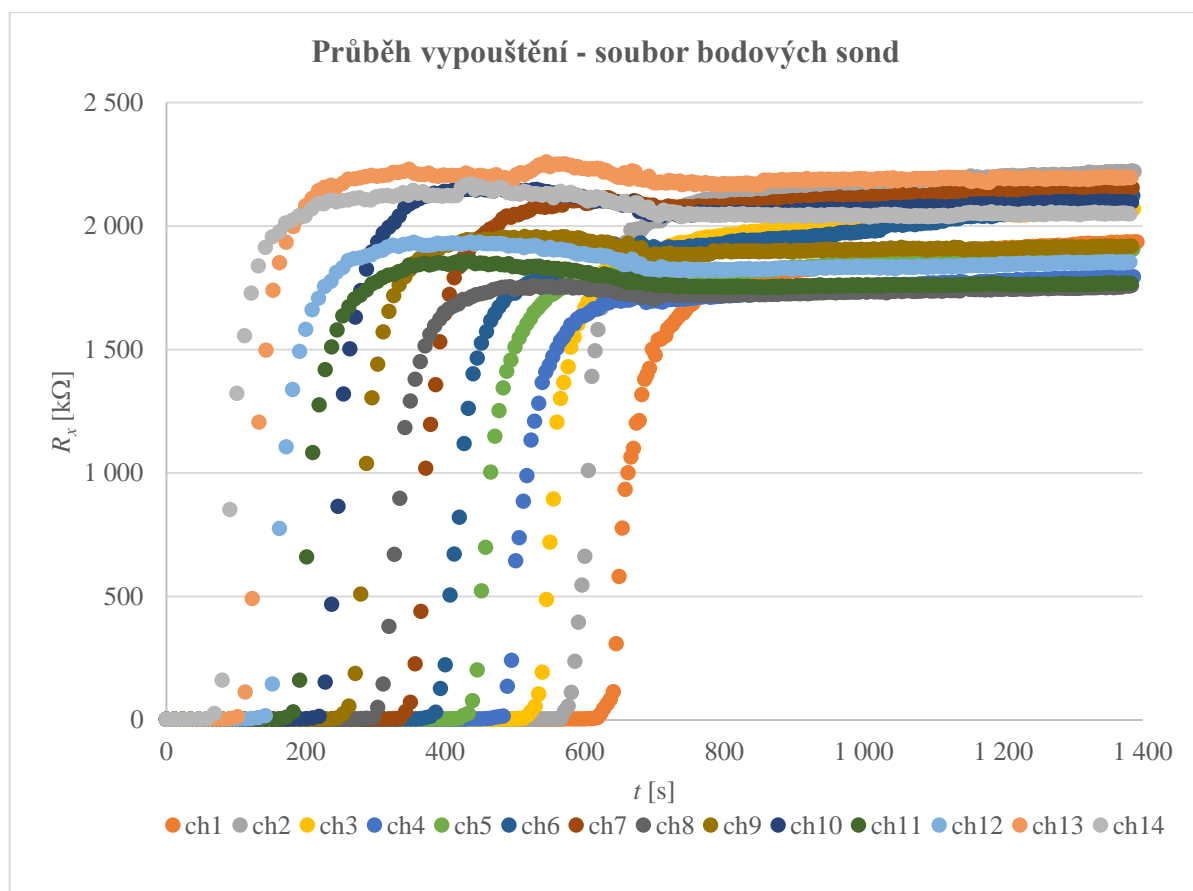
Po napuštění měřicího válce pitnou vodou odebranou z vodovodního řadu a po změření hodnot elektrické impedance přístroji Z-metr byl zahájen proces jeho vypouštění. Jednalo se o gravitační odtok vody z měřicího válce přes vypouštěcí hadici do odměrné nádoby.

Příklad zpracování dat procesu vypouštění vody z měřicího válce se vzorkem materiálu naměřených přístroji Z-metr jsou uvedeny v příloze č. 3. Příklad vykreslení procesu vypouštění je uveden na Obr. 7.23 - 7.28.

Na Obr. 7.23 a Obr. 7.24 jsou znázorněny závislosti reálné složky R_x elektrické impedance na době vypouštění t pro tyčovou sondu a pro soubor bodových sond.



Obr. 7.23 Závislost reálné složky R_x elektrické impedance na době vypouštění t – tyčová sonda

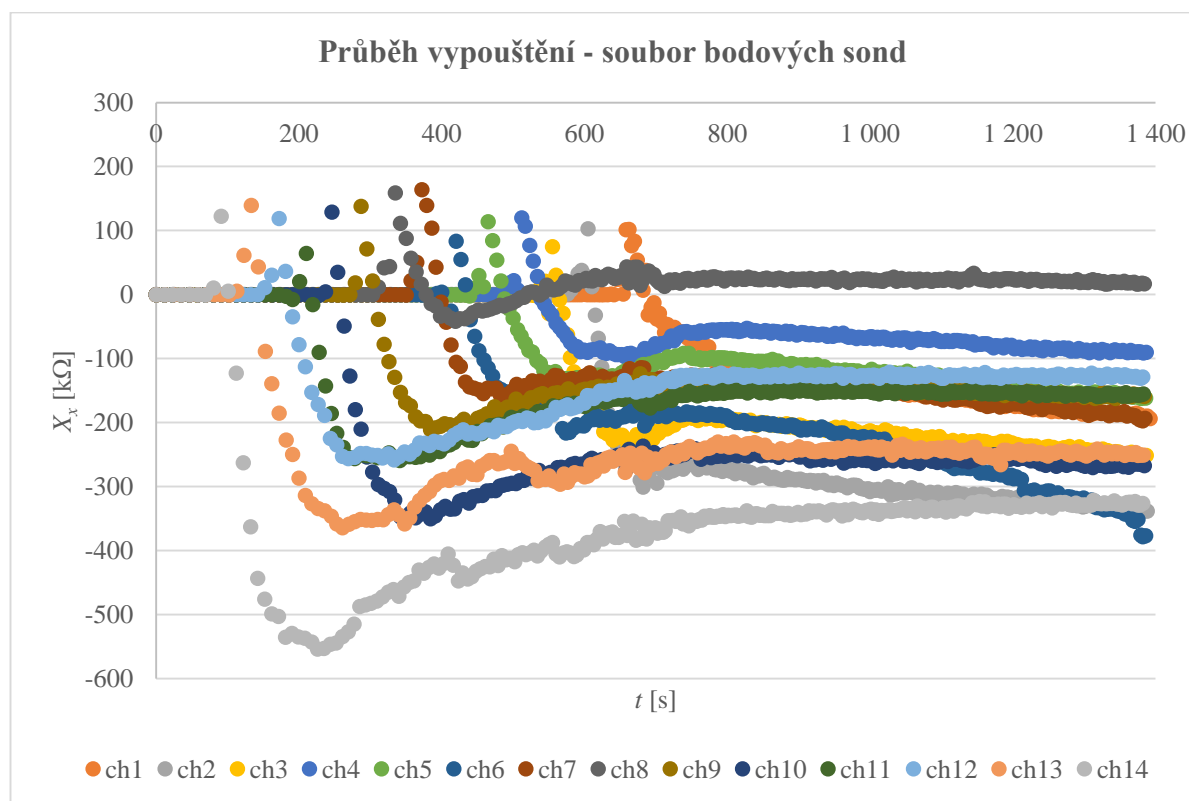


Obr. 7.24 Závislost reálné složky R_x elektrické impedance na době vypouštění t – soubor bodových sond

Na Obr. 7.25 a Obr. 7.26 jsou znázorněny závislosti imaginární složky X_x elektrické impedance na době vypouštění t pro tyčovou sondu a pro soubor bodových sond.



Obr. 7.25 Závislost imaginární složky X_x elektrické impedance na době vypouštění t – tyčová sonda

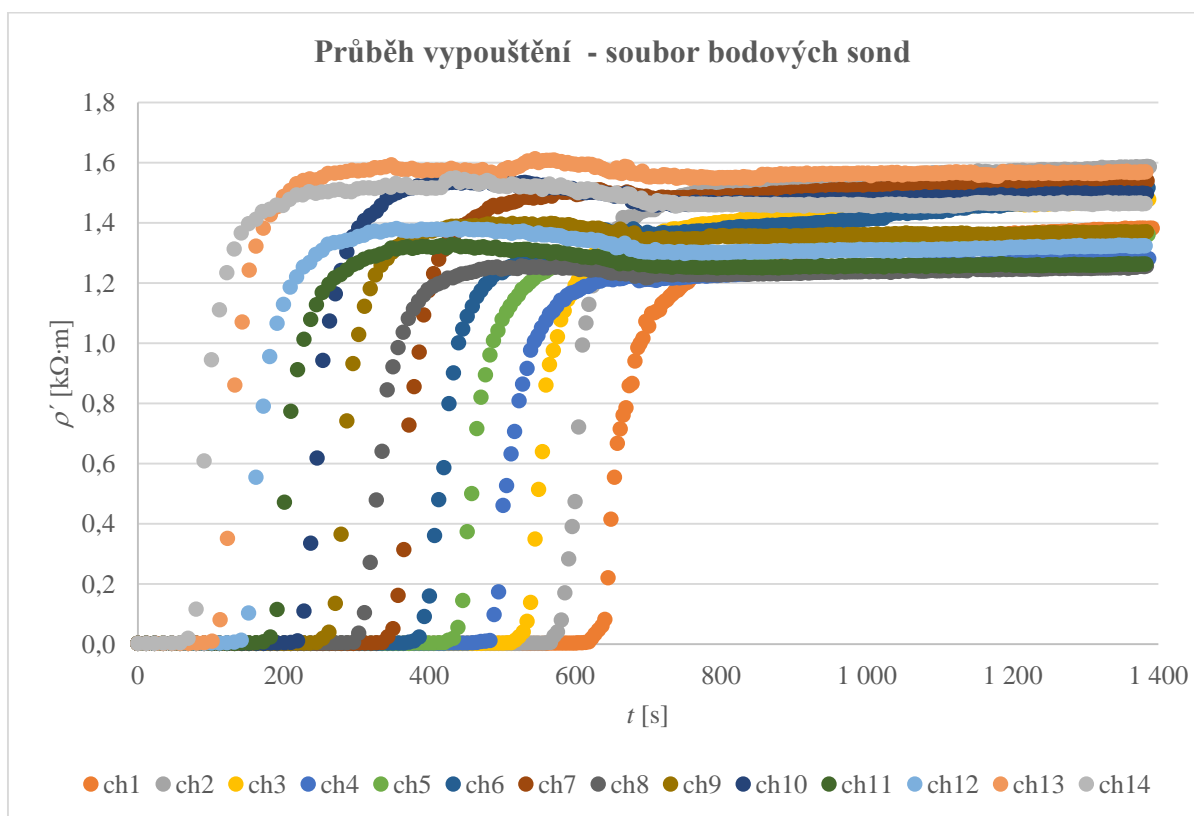


Obr. 7.26 Závislost imaginární složky X_x elektrické impedance na době vypouštění t – soubor bodových sond

Na Obr. 7.27 a Obr. 7.28 jsou znázorněny závislosti rezistivity ρ' na době vypouštění t pro tyčovou sondu a pro soubor bodových sond.



Obr. 7.27 Závislost rezistivity ρ' na době vypouštění t – tyčová sonda



Obr. 7.28 Závislost rezistivity ρ' na době vypouštění t – soubor bodových sond

Z Obr. 7.23 – 7.28 je patrné, že u daného vzorku materiálu došlo k vypuštění vody z měrného válce s materiálem přibližně po 750 sekundách. Po této době došlo k ustálení hodnot elektrické impedance měřených přístrojem Z-metr, jak u souboru bodových sond, tak u tyčové sondy. Z uvedených průběhů je zřejmé, že proces vypouštění a případně i napouštění vody z/do měřicího válce vyplněného materiálem s vodou nebo jen vodou je oběma konstrukčními typy sond měřitelný.

7.4 ZBYTKOVÁ VLHKOST MATERIÁLŮ STANOVENÁ GRAVIMETRICKOU METODOU

Gravimetrická metoda patří k nejběžnějším metodám měření vlhkosti ve stavební praxi. Jelikož je i často užívaná jako metoda pro kalibraci jiných měřidel vlhkosti, zvolila jsem si ji jako dostupnou metodou pro korelaci s hodnotami zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí stanovenými metodou EIS.

Při stanovení zbytkové vlhkosti materiálů gravimetrickou metodou byla použita digitální váha Sartorius excellence E12000S (kap. 6.4, Obr. 6.9). Před zahájením experimentu bylo provedeno tárování přesnosti digitální váhy pracovním etalonem závaží o hmotnosti 1 kg.

Během celého experimentu byly zaznamenávány hmotnosti rozhodné pro výpočet hmotnostní a objemové zbytkové vlhkosti testovaných materiálů jako např. hmotnost suchého válce, hmotnost válce a suchého materiálu, hmotnost mokrého válce, hmotnost materiálu a obalové vody atd. (Tab. 7.14). Dalšími sledovanými veličinami byl např. objem pitné vody použité při dané variantě experimentu a výška materiálu ve válci.

Tab. 7.14 Příklad měřených dat pro gravimetrickou metodu (SK 0,006 m)

Hmotnost válce suchého	2,595	kg
Hmotnost válce suchého a materiálu	7,634	kg
Hmotnost kuliček	5,039	kg
Objem kuliček se vzduchem	0,00283	m ³
Objem vody	1,4	l
Hmotnost válce, materiálu a vody	8,986	kg
Hmotnost válce, materiálu a obalové vody	7,762	kg
Hmotnost materiálu a obalové vody	5,090	kg
Hmotnost mokrého válce	2,674	kg

Na základě použití gravimetrické metody je stanovena pórovitost, objemová pórovitost, aktivní pórovitost, stupeň nasycení pórů, hmotnostní vlhkost a přirozená vlhkost. Hodnota aktivní pórovitosti – zbytková vlhkost (Tab. 7.15), byla následně porovnána s hodnotami získanými metodou EIS (kap. 7.3.2, Tab. 7.12).

Tab. 7.15 Příklad výpočtu aktivní pórovitosti gravimetrickou metodou – SK 0,006 m

Pórovitost			
<i>Veličina</i>	<i>Označení</i>	<i>Zhutněno</i>	<i>Jednotka</i>
Objem nádoby	V_n	0,0034	m ³
Objem vody	V_w	0,0014	m ³
Pórovitost	n	0,409	-

Přirozená vlhkost (reziduální)			
<i>Veličina</i>	<i>Označení</i>	<i>Zhutněno</i>	<i>Jednotka</i>
Objem nádoby	V_n	0,0034	m ³
Hustota vody	ρ_w	998	kg·m ⁻³
Hmotnost nádoby	m_n	2,595	kg
Hmotnost nádoby se suchým materiálem	m_{n+s}	7,634	kg
Hmotnost nádoby s materiálem a vodou	m_{n+s+w}	8,986	kg
Hmotnost suchého materiálu	m_s	5,039	kg
Hmotnost vody	m_w	1,352	kg
Hmotnost materiálu a vody	m_{s+w}	6,391	kg
Objemová vlhkost	θ	0,396	-
Stupeň nasycení vodou	S_w	0,967	-
Stupeň nasycení vzduchem	S_a	0,033	-
Normalizovaná efektivní objemová vlhkost	Θ	1,0	-

Aktivní pórovitost			
<i>Veličina</i>	<i>Označení</i>	<i>Zhutněno</i>	<i>Jednotka</i>
Objem nádoby	V_n	0,0034	m ³
Hustota vody	ρ_w	998	kg·m ⁻³
Hmotnost nádoby	m_n	2,595	kg
Hmotnost nádoby se suchým materiálem	m_s	7,634	kg
Hmotnost nádoby s materiálem a vodou při plném odvodnění	m_{n+s+w}	9,031	kg
Hmotnost nádoby s materiálem a vodou při volném odvodnění	m_{n+s+w_o}	7,762	kg
Objem vypuštěné vody	V_{w_o}	1,27·10 ⁻³	m ³
Aktivní pórovitost	n_a	0,372	-

Hmotnostní vlhkost			
<i>Veličina</i>	<i>Označení</i>	<i>Zhutněno</i>	<i>Jednotka</i>
Hmotnost suchého materiálu	m_s	5,039	kg
Hmotnost materiálu a vody	m_{s+w}	6,391	kg
Hmotnost vody	m_w	1,352	kg
Hmotnostní vlhkost	w	0,268	-

Objemová vlhkost			
<i>Veličina</i>	<i>Označení</i>	<i>Zhutněno</i>	<i>Jednotka</i>
Hmotnost materiálu a vody	m_{s+w}	6,391	kg
Hmotnost suchého materiálu	m_s	5,039	kg
Objem vzorku materiálu	V	0,0034	m ³
Hustota vody	ρ_w	998	kg·m ⁻³
Objemová pórovitost	θ	0,396	-

Stupeň nasycení pórů			
<i>Veličina</i>	<i>Označení</i>	<i>Zhutněno</i>	<i>Jednotka</i>
Objemová pórovitost	θ	0,396	-
Pórovitost	n	0,409	-
Stupeň nasycení pórů vodou	S_w	0,967	-
Stupeň nasycení pórů vzduchem	S_a	0,033	-

Dosažené výsledky jsou uvedeny v Tab. 7.16. Uvedené hodnoty aktivní pórovitosti testovaných materiálů odpovídají variantě experimentu, kdy materiál v měřicím válci nebyl zhutněn.

Tab. 7.16 Zbytková vlhkost materiálu stanovená gravimetrickou metodou

Materiál	Gravimetrická metoda n_a [-]	Materiál	Gravimetrická metoda n_a [-]
Skleněné kuličky 0,001m	0,346	Zrna zeminy 0,001 m	0,321
Skleněné kuličky 0,002m	0,355	Zrna zeminy 0,002 m	0,337
Skleněné kuličky 0,004m	0,354	Zrna zeminy 0,004 m	0,371
Skleněné kuličky 0,006m	0,372		

7.5 POROVNÁNÍ METODY EIS S METODOU GRAVIMETRICKOU

U každého vybraného materiálu byla stanovena zbytková vlhkost dvěma metodami, a to metodou EIS a metodou gravimetrickou. Obdržené výsledky byly vzájemně porovnány a byla stanovena jejich odchylka (Tab. 7.17 a Tab. 7.18). V případě hodnot měřených metodou EIS byla zbytková vlhkost pórovitého prostředí stanovena zvlášť pro soubor bodových sond a zvlášť pro tyčovou sondu. Vzhledem k tomu, že jsem v průběhu měření upřesňovala postup přípravy vzorků a jednotlivé kroky měření, je závěrečnou tabulkou dosažených výsledků Tab. 7.19 a Tab. 7.20. V ní zeleně podbarvené buňky reprezentují hodnoty dosažené při standardizovaném postupu měření.

Tab. 7.17 Porovnání metody EIS s metodou gravimetrickou – tyčová sonda

Tyčová sonda	EIS			Gravimetrická metoda		
Materiál	Zhutněno		Bez zhutnění	Zhutněno		Bez zhutnění
	před	po		před	po	
Skleněné kuličky 0,001 m	0,346	-	0,283	0,352	-	0,346
Skleněné kuličky 0,002 m	0,302	0,310	0,302	0,347	0,367	0,355
Skleněné kuličky 0,004 m	0,295	0,340	0,272	0,349	0,354	0,354
Skleněné kuličky 0,006 m	-	0,284	0,295	-	0,342	0,372
Zrna zeminy 0,001 m	-	-	0,383	-	-	0,321
Zrna zeminy 0,002 m	-	-	0,376	-	-	0,337
Zrna zeminy 0,004 m	0,383	-	0,363	0,372	-	0,371

Tab. 7.18 Porovnání metody EIS s metodou gravimetrickou – soubor bodových sond

Soubor bodových sond	EIS			Gravimetrická metoda		
Materiál	Zhutněno		Bez zhutnění	Zhutněno		Bez zhutnění
	před	po		před	po	
Skleněné kuličky 0,001 m	0,264	-	0,273	0,352	-	0,346
Skleněné kuličky 0,002 m	0,289	0,315	0,301	0,347	0,367	0,355
Skleněné kuličky 0,004 m	0,305	0,295	0,305	0,349	0,354	0,354
Skleněné kuličky 0,006 m	-	0,301	0,309	-	0,342	0,372
Zrna zeminy 0,001 m	-	-	0,374	-	-	0,321
Zrna zeminy 0,002 m	-	-	0,358	-	-	0,337
Zrna zeminy 0,004 m	0,370	-	0,372	0,372	-	0,371

Z výsledků je patrné, že pro stanovení zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí metodou EIS je vhodnější používat invazivní tyčovou sondu. Tyčovou sondou metody EIS je při měření zohledněna větší plocha testovaného materiálu umístěného mezi elektrodami sondy, čímž je i lépe postiženo rozložení pevných částic materiálu a pórů v měřené oblasti. Užití souboru

bodových sond vychází z velmi přísného předpokladu homogenního rozložení pevných částic materiálu a pórů ve všech měřených úrovních. Výsledky laboratorních zkoušek však ukázaly, že uvedeného požadavku vždy dosaženo nebylo.

Tab. 7.19 Porovnání metody EIS s metodou gravimetrickou – tyčová sonda

Tyčová sonda	EIS			Gravimetrická metoda			Odchylka [%]		
Materiál	Zhutněno		Bez zhutnění	Zhutněno		Bez zhutnění	Zhutněno		Bez zhutnění
	před	po		před	po		před	po	
SK 0,001 m	0,346	0,352	0,283	0,352	0,354	0,346	1,70	0,56	5,20
SK 0,002 m	0,302	0,310	0,302	0,347	0,367	0,355	12,97	15,53	14,93
SK 0,004 m	0,295	0,340	0,272	0,349	0,354	0,354	15,47	3,95	23,16
SK 0,006 m	0,300	0,284	0,295	0,367	0,342	0,372	18,26	16,96	20,70
ZZ 0,001 m	0,359	0,370	0,383	0,367	0,368	0,321	2,18	-0,54	-19,31
ZZ 0,002 m	0,366	0,341	0,376	0,372	0,363	0,337	1,61	6,06	-11,57
ZZ 0,004 m	0,383	0,376	0,363	0,372	0,378	0,371	-2,96	0,53	2,16

Tab. 7.20 Porovnání metody EIS s metodou gravimetrickou – soubor bodových sond

Bodové sondy	EIS			Gravimetrická metoda			Odchylka [%]		
Materiál	Zhutněno		Bez zhutnění	Zhutněno		Bez zhutnění	Zhutněno		Bez zhutnění
	před	po		před	po		před	po	
SK 0,001 m	0,264	0,300	0,273	0,352	0,368	0,346	25,00	18,48	21,10
SK 0,002 m	0,289	0,315	0,301	0,347	0,367	0,355	16,71	14,17	15,21
SK 0,004 m	0,305	0,295	0,305	0,349	0,354	0,354	12,61	16,67	13,84
SK 0,006 m	0,317	0,301	0,309	0,368	0,342	0,372	13,86	19,09	16,94

Bodové sondy	EIS			Gravimetrická metoda			Odchylka [%]		
Materiál	Zhutněno		Bez zhutnění	Zhutněno		Bez zhutnění	Zhutněno		Bez zhutnění
	před	po		před	po		před	po	
ZZ 0,001 m	0,356	0,364	0,374	0,368	0,374	0,321	3,26	2,67	-16,51
ZZ 0,002 m	0,334	0,341	0,358	0,362	0,371	0,337	7,73	8,09	-6,23
ZZ 0,004 m	0,370	0,385	0,372	0,372	0,378	0,371	0,54	-1,85	-0,27

Ačkoli lze na základě výsledků uvedených v Tab. 7.12 konstatovat, že maximální odchylka hodnot zbytkové vlhkosti určené na základě měření aktivní pórovitosti materiálů reprezentujících pórovité prostředí mezi oběma konstrukcemi měřících sond metody EIS leží v intervalu $<-6,0; +17,0>$ %, při podrobnějším pohledu na výsledky uvedené v Tab. 7.19 a Tab. 7.20 jsou rozdíly již zřejmější, a to jak vzhledem k postupu měření, tak i vzhledem k hodnotám dosaženým gravimetrickou metodou či vzhledem k jednotlivým materiálům.

Pro hodnoty získané měřením tyčovou sondou metody EIS je maximální odchylka od hodnot získaných gravimetrickou metodou do ± 20 %. Výraznější odchylky jsou pro materiály nezhutněné, proto z důvodu zvýšení přesnosti měření sledovaného parametru lze doporučit materiál před měřením vždy zhutnit. Zhutnění bylo provedeno vibrací a propíchnutím. Zda má být zhutnění provedeno před nebo po zatížení měřeného materiálu vodou již není zcela jednoznačné a volba zůstává spíše na uvážení a zkušenostech měřiče. Za povšimnutí rovněž stojí skutečnost, že výrazně menších odchylek, průměrná hodnota odchylky je 1,82 %, měřených hodnot stanovených oběma metodami bylo dosaženo při měření přírodního materiálu (frakcí bratčického písku). Stejného výsledku bylo dosaženo i při měření souborem bodových sond, kdy průměrná hodnota zjištěné odchylky mezi oběma metodami je 3,41 %. Obě zjištěné hodnoty průměrné odchylky se v případě měřených přírodních materiálů nacházejí pod hranicí stanovených ± 5 % přesnosti měření přístroji Z-metr ve frekvenčním spektru. Na základě uvedeného lze konstatovat, že pro daný experiment detekce zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí lze použít obě konstrukční řešení měřících sond metody EIS s tím, že především v případě umělých materiálů může při měření dojít k častějšímu výskytu chybových dat. Rovněž lze konstatovat, že se v konečných výsledcích v obou případech konstrukce sond EIS téměř potírá rozdíl, zda byl měřený umělý materiál zhutněn či nikoli.

8 ZÁVĚR

Ve své diplomové práci jsem řešila otázkou využití metody EIS pro detekci zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí. Experiment jsem provedla v laboratorních podmínkách v Laboratoři vodohospodářského výzkumu ÚVST. Pro všechny varianty experimentu jsem využila měřicí válec se souborem bodových sond o celkovém počtu 16 snímačů a tyčovou sondu, které jsem si po konzultaci se školitelkou a realizátorem měřicího stanoviště pro experiment navrhla. V obou případech konstrukčního řešení sond byly měřicí elektrody vyrobeny z nerezavějící oceli. Pro měření metodou EIS jsem využila přístroje Z-metr, konkrétně přístroje Z-metr III, Z-metr IV v.0 a Z-metr IV, které jsou realizovány a ověřovány řešením mezinárodních projektů v programu EUREKA. Výsledky dosažené aplikací měřicí techniky EIS jsem srovnala s výsledky stanovení zbytkové vlhkosti testovaných materiálů gravimetrickou metodou.

Na základě svých poznatků z experimentální práce bych pro úlohu detekce zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí metodou EIS při využití přístrojů Z-metr doporučovala následující postup

- Podle povahy experimentu navrhnout měřicí sondu (invazivní / neinvazivní řešení), při respektování požadavku reprezentativního vzorku zkoumaného materiálu a konfigurace měření. Např. při aplikaci invazivní sondy je nutné dbát i skutečnosti, že elektrody sondy musí být v dostatečné vzdálenosti od stěny měřicího válce, aby nedocházelo k deformaci buzeného elektrického pole.
- Provést frekvenční analýzu zkoumaného pórovitého prostředí.
- Podle povahy experimentu, zrnitostních křivek zkoumaných materiálů a výsledků frekvenční analýzy zvolit pro experiment měřicí frekvenci.
 - Povaha experimentu – pokud je třeba provést srovnání jednotlivých vzorků materiálu je vhodné, i za cenu snížení citlivosti měřicí aparatury vůči zkoumanému prostředí, volit jednu měřicí frekvenci vyvozenou na základě frekvenční analýzy, pokud je podmínkou neporušit zkoumaný vzorek je nutné volit bodové sondy, přestože především při měření umělých materiálů se ukazuje přesnost měření nižší;
 - Zrnitostní křivky – v LVV ÚVST byla s rozvojem měřicí aparatury s metodou EIS hledat závislost mezi velikostí zrn zeminy a měřicí frekvencí. Přestože z hlediska statistického hodnocení je závislost vyhodnocena pro malé množství vzorku zeminy, lze na základě provedení frekvenční analýzy provést odhad velikosti matrice zrna zkoumaného vzorku zeminy. Je-li velikost zrna zeminy s malým rozptylem, lze pro měření všech vzorků použít jednu měřicí frekvenci, a to takovou, na níž charakteristika měřené veličiny vykazuje největší odchylku.
- Připravit měření tak, aby okolní podmínky měření měly na experiment minimální vliv a ten byl po celou dobu měření konstantní. Zde se jedná především o teplotu, vlhkost a tlak vzduchu. Dosažené odchylky ve stanovení zbytkové vlhkosti metodou EIS by

bylo možné snížit např. při měření v hermeticky uzavřeném temperovaném boxu za kontinuálního snímání teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu.

- Zajistit minimální manipulaci s měřicím válcem naplněným sledovaným materiálem. Elektrické vodiče ukládat před měřením vždy stejně. Při různém uložení vodičů přenášejících měřený signál od snímače do přístroje Z-metr na nich vzniká parazitní elektrická impedance, která může ovlivnit měřenou hodnotu. Uvedené skutečnosti je třeba věnovat zvýšenou pozornost především při hutnění vzorku na vibračním zařízení (třepačka).
- Zvolit metodu pro komparaci hodnot sledované veličiny – zbytkové vlhkosti.
- Provést korelaci hodnot stanovených oběma měřicími metodami.

K uvedenému postupu jsem dospěla až v průběžném měření a zpracovávání zjištěných hodnot. V Tab. 7.19 a Tab. 7.20 podbarvené buňky reprezentují výsledky dosažené při jeho dodržení.

Pro komparaci jsem k metodě EIS volila gravimetrickou metodu ze dvou důvodů, a to dostupnosti měřicí aparatury v laboratorních podmínkách měření v LVV a rovněž z důvodu, že je v mnoha případech používána i pro kalibraci měřidel vlhkosti. Ani ona však není přímou metodou stanovení vlhkosti, neboť se stanovuje hmotnostní nebo objemová vlhkost tj. vzorek je nutno odebrat (metoda je destruktivní) a je nutno mít k dispozici následně měřidla odpovídající přesnosti. Navíc nelze odebrat dva vzorky z jednoho místa, takže existuje nemožnost opakovaných měření, další nevýhodou je časové zpoždění informace, protože výsledek je možné získat až po vysušení vzorku. Vzhledem ke skutečnosti, že metoda EIS je elektrická nepřímá měřicí metoda, bylo by z hlediska metrologické návaznosti ke komparaci volit jinou elektrickou metodu. Nabízí se metody odporové – jedná se zpravidla o metody využívající k měření stejnosměrný proud. Je známo, že elektrický odpor materiálů se mění v závislosti na jeho vlhkosti, avšak metoda selhává v měřeních, kdy materiály vykazují zvýšený obsah solí (vlivem iontové vodivosti solí dochází k nárůstu elektrické vodivosti). Dále je možné použít metody dielektrické, kdy se měří reálná (případně i imaginární) složka komplexní relativní permitivity, která je měřena jako funkce obsahu vody v materiálu, v kapitole 4.2 je uvedena metoda kapacitní, známy jsou metody radiometrické založené na absorpci β nebo g záření nebo vázání či rozptýlení neutronů, metoda nukleární magnetické rezonance, kdy absorpce vysokofrekvenční energie v materiálu vystaveném magnetickému poli je měřena jako funkce obsahu vody (rozlišuje vodu volnou a vázanou), atd. Všechny uvedené metody by byly vhodné, avšak LVV nedisponuje žádným zařízením, které by je aplikovalo. Důvodem je jistě i jejich cenová náročnost.

Metoda EIS využívá frekvenční závislosti elektrických impedančních charakteristik k analýze vlastností pórovitého prostředí. Lze ji s výhodou použít k nedestruktivnímu sledování. Změna vlhkosti (obsahu vody) materiálu je doprovázena změnou jeho elektrických vlastností, kdy se elektrický odpor může měnit v rozsahu několika řádů. Hodnoty rezistivity ρ' suchého pórovitého prostředí se mohou pohybovat v rozsahu $10^8 \Omega \cdot m$ až $10^{13} \Omega \cdot m$, zatímco

přítomnost vody může tuto hodnotu snížit až na $10^{-4} \Omega \cdot m$. Změny se promítají i do hodnot reaktance X , kde lze frekvencí detekovat velikost zrn, změnu hutnosti, rozbředání apod. Pórovité prostředí však není jednoduchou směsí matrice a vody. Na jeho elektrické vlastnosti má vliv vázání vody v materiálu, přítomnost iontů anorganických solí rozpuštěných ve vodě, důležitý je vliv teploty. Pro je mnohdy výhodnější než vyjádření procentuální vlhkosti (kdy by pro každý materiál byla nutná kalibrace aparatury), sledovat změny prostředí např. vysychání či zavodňování apod. Abych do experimentu stanovení zbytkové vlhkosti nevnášela další nejistoty měření při kalibraci použité aparatury EIS na vlhkost, zvolila jsem její bezrozměrné poměrové vyjádření $\left(\frac{\rho'_{vody}}{\rho_{vzorek}}\right)$.

Myslím si, že použití nepřímé měřicí metody elektrické impedanční spektrometrie pro detekci zbytkové vlhkosti pórovitého prostředí je vhodné, za předpokladu dodržení pracovního postupu a pracovní kázně.

V Brně dne 15.01.2016

.....

podpis autora

Bc. Zuzana Münsterová

9 POUŽITÁ LITERATURA

- [01] BERLINER, M. A. *Izmerenija vlažnosti*. 3. Vyd. Moskva, Energija. 1973.
- [02] Bobtnání. *Wikipedie* [online]. 2001 [cit. 2015-11-28]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Bobtnani>
- [03] CRAIG, R. F. *Craig's soil mechanics*. 7th ed. London: Spon, 2004. ISBN 02-035-7441-9.
- [04] CUNNINGHAM, M. J. *Automatic data logging timber moisture contents over the range 10 % – 50 % w/w*. *ISA Trans.*, 25, 1986, 3, 73-80.
- [05] ČALADZE, A.P., MELKUMJAN, V.E. *Obrazcovaja termogravimetričeskaja ustanovka dlja opredelenija vlažnosti tverдых veščestv i materialov*. *Izmer, tehnika*, 23, 1980, 4, 50-51.
- [06] DEAN, T. J. et al. *Soil moisture measurement by an improved capacitance technique*. *J. Hydrol.*, 93, 1987, ½, 67-90.
- [07] Description of the Z-Meter IV. In: *EUREKA 2014*. Ed. 1st. Brno: VUTIUUM, 2014, s. 5. ISBN 978-80-214-4883-4.
- [08] DUCHAN, David, Jaromír ŘÍHA a Zbyněk ZACHOVAL. *Hydraulické aspekty infiltrace dešťových vod: Hydraulika vsakování dešťových vod*. První. Brno: LITERA, 2014. ISBN 978-80-214-5017-2.
- [09] *EUREKA 2012: 3rd conference and working session : schedule, proceedings: September 20.-21.2012, Brno University of Technology*. Ed. 1st. Editor Jana Pařílková, Lubomír Procházka. Brno: VUTIUUM, 2012, 256 s. ISBN 978-80-214-4537-6.
- [10] *EUREKA 2013: 1st conference and working session within the frame of the international program EUREKA, project no. E!7614 : October 30 to November 1, 2013: Karolinka, Czech Republic*. Ed. 1st. Editor Jana Pařílková, Lubomír Procházka. Brno: VUTIUUM, 2013, 275 s. ISBN 978-80-214-4735-6.
- [11] FEXA, Josef, ŠIROKÝ, Karel. *Měření vlhkosti*. Praha: SNTL a ALFA, 1983. 262s.
- [12] HRABAL, A. *Příspěvek k řešení komplexních vodohospodářsko-melioračních soustav v intenzivní zemědělské oblasti jižní Moravy: [Autoreferát kand. Dis.]*. Brno: [s.n.], 1976. 19 s.
- [13] *Humidity and moisture. Vol. IV: Principles and methods of measuring moisture in liquids and solids*. (Winn, P. N. Jr., editor). 1. vyd. New York, Reinhold 1965.
- [14] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: modul 01*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 178 s. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [15] KRAUS, Jiří a Vladimír LUDVÍK. *Sborníky technické harmonizace: Terminologie z oblasti metrologie*. Dostupné z http://www.unmz.cz/sborniky_th/sb10/terminologie.pdf

- [16] LAMBOJ, Ladislav a Zdeněk ŠTĚPÁNEK. *Mechanika zemin a zakládání staveb*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 218 s. ISBN 978-800-1030-943.
- [17] MITCHELL, J., SMITH, D:M. *Aquametry*. 1. Až 3. Díl, 2. Vyd. New York, Wiley 1977 (1. díl), 1984 (2. díl), 1980 (3. díl)
- [18] MORGAN, Kelly, Rafael MUNOZ-CARPENA and Sanjay SHUKLA. *Field devices for monitoring soil water content*. Regional Extension Bulletin no. SR-IWM-2. The Irrigation Water Management Program Team of the Southern Regional Water Program. USDA-CSREES. Dostupné z: http://www.bae.ncsu.edu/topic/go_irrigation/docs/Field-devices-monitoring-.pdf
- [19] MUCHA, Igor a Vsevolod ŠESTAKOV. *Hydraulika podzemných vôd*. Vyd. 1. Praha: SNTL a ALFA, 1987, 344 s.
- [20] NOVÁK, Michael, Luboš PAŘÍLEK, Jana PAŘÍLKOVÁ a Jaroslav VESELÝ. *Aplikace metody EIS při monitorování hydrologických jevů*. 34 s.
- [21] PANDE, A. *Handbook of moisture determination and control*. 1. až 4. díl, 1. Vyd. New York, Dekker 1974 (1. díl), 1975 (2. až 4. díl).
- [22] PAŘÍLKOVÁ, J.; FEJFAROVÁ, M.; ORTEGA, E. L.; VAN DE WALLE, B.; GOMBOŠ, M. *Detection of the size of the effective grain using the EIS method*. In *EUREKA 2014*. neuv. Brno University of Technology: VUTIAM, 2014. p. 49-60. ISBN: 978-80-214-4883- 4.
- [23] PAŘÍLKOVÁ, J.; ZACHOVAL, Z.; MŮNSTEROVÁ, Z.; VAN DE WALLE, B.; GOMBOŠ, M. *Detection of the size of the effective grain using the EIS method*. In *EUREKA 2015 - 3rd conference and working session*. EUREKA. neuv. Brno: Brno University of Technology, VUTIAM, 2015. p. 84-91. ISBN: 978-80-214-5149- 0. ISSN: 2464- 4595.
- [24] PAŘÍLKOVÁ, Jana. *Monitorování proudění vody zeminou a možnosti jeho využití u ochranných hrází*. Brno: VUTIAM, 2010, 30 s. ISBN 978-80-214-4068-5.
- [25] PAŘÍLKOVÁ, Jana. *Z-meter III - User's Manual*, Brno University of Technology, Brno, 2011
- [26] PITTER, Pavel. *Hydrochemické tabulky*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 320 s.
- [27] ŘÍHA, Jaromír. *Hydraulika podzemní vody: modul 01*. Brno 2005
- [28] SEDLÁK, Bedřich. *Elektřina a magnetismus*. Praha: Academia, 1993, 600 s. ISBN 80-200-0172-7.
- [29] Snímač objemové vlhkosti půdy VIRRIB. *AMET* [online]. [cit. 2015-11-28]. Dostupné z: <http://www.amet.cz/virribcz.html>

- [30] ŠEVČÍK, R. *The calibration and metrological linkage of the Z-meter IV. In EUREKA 2014.* neuv. Brno University of Technology: VUTIUM, 2014. p. 32-44. ISBN: 978-80-214-4883- 4.
- [31] ŠEVČÍK, R. *The calibration and metrological follow-up of the Z- meter IV. In EUREKA 2015 - 3rd conference and working session. EUREKA.* neuv. Brno: Brno University of Technology, VUTIUM, 2015. p. 39-47. ISBN: 978-80-214-5149- 0. ISSN: 2464- 4595.
- [32] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin.* Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 186 s. ISBN 978-80-7204-507-5.
- [33] YUKI, H. *High frequency moisture gauge with memory capacity of 90 kinds of check lines.* Instrumentation, 29, 1986, 3, 55-58.

SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1 Základní parametry měřicích přístrojů Z-metr	34
Tab. 6.1 Invazivní tyčová sonda – charakteristické parametry	40
Tab. 6.2 Soubor neinvazivních bodových sond – charakteristické parametry	40
Tab. 6.3 Měřicí válec – charakteristické parametry	41
Tab. 6.4 Základní charakteristické hodnoty – skleněné kuličky	42
Tab. 6.5 Stanovení hustoty skleněných kuliček	42
Tab. 6.6 Základní charakteristické hodnoty – zrna zeminy	43
Tab. 6.7 Stanovení hustoty zrn zeminy	43
Tab. 7.1 Nastavení parametrů přístroje Z-metr	45
Tab. 7.2 Hodnoty reálné a imaginární složky – tyčová sonda.....	50
Tab. 7.3 Hodnoty reálné a imaginární složky – soubor bodových sond	50
Tab. 7.4 Poloha bodových sond	51
Tab. 7.5 Nastavení parametrů přístroje Z-metr	53
Tab. 7.6 Elektrická konduktivita roztoku KCl o koncentraci $0,01 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-3}$ při různých teplotách	53
Tab. 7.7 Délka vodiče – tyčová sonda.....	54
Tab. 7.8 Měření pitné vody – soubor bodových sond	55
Tab. 7.9 Nastavení parametrů přístroje Z-metr	57
Tab. 7.10 Příklad zpracování dat po zatížení vzorku materiálu vodou – tyčová sonda	59
Tab. 7.11 Příklad zpracování dat po zatížení vzorku materiálu vodou – soubor bodových sond	59
Tab. 7.12 Zbytková vlhkost materiálu stanovená metodou EIS.....	64
Tab. 7.13 Nastavení parametrů přístroje Z-metr	65
Tab. 7.14 Příklad měřených dat pro gravimetrickou metodu (SK 0,006 m)	69
Tab. 7.15 Příklad výpočtu aktivní pórovitosti gravimetrickou metodou – SK 0,006 m	70
Tab. 7.16 Zbytková vlhkost materiálu stanovená gravimetrickou metodou	71
Tab. 7.17 Porovnání metody EIS s metodou gravimetrickou – tyčová sonda.....	72
Tab. 7.18 Porovnání metody EIS s metodou gravimetrickou – soubor bodových sond	72
Tab. 7.19 Porovnání metody EIS s metodou gravimetrickou – tyčová sonda.....	73
Tab. 7.20 Porovnání metody EIS s metodou gravimetrickou – soubor bodových sond	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Rozdělení vody v půdním a horninovém profilu.....	16
Obr. 2.2 Difúzní obal (lyosféra)	17
Obr. 2.3 Schéma proudění vody podle Darcyho vztahu.....	19
Obr. 2.4 Experimentální stanoviště hydraulické vodivosti – LVV ÚVST, blok „F“	20
Obr. 3.1 Tři složkové složení zeminy o objemu V zeminy a hmotnosti m	21
Obr. 3.2 Křivka zrnitosti.....	24
Obr. 4.1 Snímače půdní vlhkosti VIRRIB.....	29
Obr. 4.2 Harmonický proud s počáteční fází a fázor proudu v rovině x, y	30
Obr. 4.3 Grafické znázornění elektrické impedance	32
Obr. 4.4 Příklad typové řady Z-metr (Z-metr I, II a IIa)	33
Obr. 5.1 Měřicí přístroj Z-metr III.....	34
Obr. 5.2 Konektory pro připojení měřicích sond (Z-metr III).....	35
Obr. 5.3 Měřicí přístroj Z-metr IV v.0	35
Obr. 5.4 Konektory pro připojení měřicích sond (Z-metr IV v.0).....	36
Obr. 5.5 Měřicí přístroj Z-metr IV	36
Obr. 5.6 Konektory pro připojení měřicích sond (Z-metr IV).....	37
Obr. 5.7 Příklad uživatelského menu	37
Obr. 5.8 Příklad nastavení parametrů měření	38
Obr. 5.9 Příklad uložení nastavení, názvu výstupního souboru a záznamu měření	38
Obr. 5.10 Příklad výstupních dat	38
Obr. 6.1 Měřicí aparatura pro metodu EIS (Z-metr III, Z-metr IV v.0 a Z-metr IV).....	39
Obr. 6.2 Měřicí sondy (a – tyčová sonda, b – soubor bodových sond)	39
Obr. 6.3 Měřicí válec.....	40
Obr. 6.4 Použitý materiál (a – skleněné kuličky, b – zrna zeminy)	41
Obr. 6.5 Skleněné kuličky (0,001 m, 0,002 m, 0,004 m a 0,006 m)	41
Obr. 6.6 Stanovení objemu – skleněné kuličky	42
Obr. 6.7 Zrna zeminy (0,001 m, 0,002 m a 0,004 m).....	43
Obr. 6.8 Stanovení objemu – zrna zeminy	43
Obr. 6.9 Testo 454, třepačka a digitální váha.....	44
Obr. 6.10 Svinovací metr, digitální měřidlo a trychtýře.....	44
Obr. 6.11 Kádinka, odsávačka a digitální fotoaparát	44
Obr. 7.1 Příklad odstraněných dat – tyčová sonda	47
Obr. 7.2 Příklad odstraněných dat – soubor bodových sond (kanál 5).....	47
Obr. 7.3 Frekvenční analýza – tyčová sonda.....	48

Obr. 7.4 Frekvenční analýza – soubor bodových sond.....	48
Obr. 7.5 Frekvenční analýza – tyčová sonda.....	49
Obr. 7.6 Frekvenční analýza – soubor bodových sond.....	49
Obr. 7.7 Závislost měřicí frekvence na velikosti efektivního zrna.....	51
Obr. 7.8 Měřicí válec se sondami	52
Obr. 7.9 Umístění smršťovací hadice na volné konce elektrod tyčové sondy (a), geotextilie (b)	52
Obr. 7.10 Závislost reálné složky R_x elektrické impedance na změně hloubky h	56
Obr. 7.11 Závislost imaginární složky X_x elektrické impedance na změně hloubky h	56
Obr. 7.12 Závislost rezistivity ρ' na změně hloubky h	57
Obr. 7.13 Příklad měřicího válce po nasypání materiálu (a – skleněné kuličky, b – zrna zeminy)	58
Obr. 7.14 Příklad průběhu experimentu	58
Obr. 7.15 Příklad odstranění chybových dat zjištěných souborem bodových sond	60
Obr. 7.16 Závislost R_x na hloubce h po zatížení vzorků vodou – tyčová sonda.....	61
Obr. 7.17 Závislost R_x na hloubce h po zatížení vzorků vodou – soubor bodových sond	61
Obr. 7.18 Vyhodnocená závislost X_x na hloubce h po zatížení vzorků vodou – tyčová sonda	62
Obr. 7.19 Vyhodnocená závislost X_x na hloubce h po zatížení vzorků vodou – soubor bodových sond.....	62
Obr. 7.20 Závislost ρ' na hloubce h po zatížení vzorku vodou – tyčová sonda.....	63
Obr. 7.21 Závislost ρ' na hloubce h po zatížení vzorku vodou – soubor bodových sond.....	63
Obr. 7.22 Umístění měřicího válce na třepače.....	64
Obr. 7.23 Závislost reálné složky R_x elektrické impedance na době vypouštění t – tyčová sonda	66
Obr. 7.24 Závislost reálné složky R_x elektrické impedance na době vypouštění t – soubor bodových sond.....	66
Obr. 7.25 Závislost imaginární složky X_x elektrické impedance na době vypouštění t – tyčová sonda.....	67
Obr. 7.26 Závislost imaginární složky X_x elektrické impedance na době vypouštění t – soubor bodových sond.....	67
Obr. 7.27 Závislost rezistivity ρ' na době vypouštění t – tyčová sonda.....	68
Obr. 7.28 Závislost rezistivity ρ' na době vypouštění t – soubor bodových sond	68

SEZNAM PŘÍLOH

1. Zpracování dat – Frekvenční analýza
2. Zpracování dat – Metoda EIS – Po zatížení vzorku materiálu vodou
3. Zpracování dat – Metoda EIS – Vypouštění vody z měřicího válce
4. Zpracování dat – Metoda gravimetrická – Měřená data
5. Zpracování dat – Metoda gravimetrická – Výpočet zbytkové vlhkosti

Pozn. V přílohách jsou uvedeny vzory zpracování měřených dat, všechna (surová i zpracovaná) data jsou uložena na přiloženém CD.